

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
ЭНЕРГЕТИКА

<p>Министерство образования и науки Российской Федерации</p> <p>Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина</p> <p>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКА</p> <p>Сборник научных трудов</p> <p>Екатеринбург Издательство Уральского университета 2015</p>	<p>УДК 620.22+621+620.9 M382</p> <p><i>Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.</i></p> <p>Под руководством В. В. Кружаева – проректора по науке УрФУ</p> <p>Редакционная коллегия: А. А. Богатов – заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Институт материаловедения и металлургии УрФУ, профессор, доктор технических наук; М. А. Гervасев – заведующий кафедрой материаловедения, Институт материаловедения и металлургии, профессор, доктор технических наук; А. А. Попов – заведующий кафедрой термообработки и физики металлов, Институт материаловедения и металлургии УрФУ, профессор, доктор технических наук; А. А. Петунин – заместитель директора института по науке и инновациям, профессор кафедры информационных технологий и автоматизации проектирования, Механико-машиностроительный институт УрФУ, профессор, доктор технических наук; Е. А. Митюшов – профессор кафедры теоретической механики, Институт фундаментального образования УрФУ, профессор, доктор физико-математических наук; Г. Г. Кожушко – профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов Механико- машиностроительного института УрФУ, профессор, доктор технических наук; Я. Л. Либерман – доцент кафедры станков и инструментов, Механико-машиностроительный институт УрФУ, кандидат технических наук, доктор наук honoris causa РАЕ, профессор ЮНЕСКО, профессор РАЕ; В. А. Мунц – заведующий кафедрой теплотехники и теплоэнергетики, Уральский энергетический институт УрФУ, профессор, доктор технических наук; А. М. Зюзов – профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский энергетический институт УрФУ, профессор, доктор технических наук; С. Е. Кокни – заместитель директора Института по науке и инновациям, Уральский энергетический институт, УрФУ, профессор, доктор технических наук; В. А. Овчинникова – отв. за выпуск.</p> <p>Материаловедение. Машиностроение. Энергетика [Электронный ресурс] : [сб. науч. тр.] / под рук. В. В. Кружаева ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – с. В сборнике научных трудов рассматриваются актуаль- ные проблемы материаловедения и металлургии, машиностро- ения, энергетики и экономики производств. Предназначен для всех интересующихся данными про- блемами</p> <p>ISBN 978-5-7996-1519-2</p> <p>УДК 620.22+621+620.9</p> <p>Электронное издание</p> <p>Издательство Уральского университета 620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4 Тел.: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13 Факс: +7 (343) 358-93-06 E-mail: press-urfu@mail.ru</p> <p>© Уральский федеральный университет, 2015</p>
---	--

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ТРУДНООБОГАТИМЫХ ПИРИТНЫХ-МЕДНО-ЦИНКОВЫХ, ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССОВ ФЛОТАЦИИ И КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. А. Бочаров, В. А. Игнаткина А. А. Каюмов
НИТУ «МИСиС»

М. Г. Видуецкий, В. А. Мальцев
Уральский федеральный университет

В статье приведен анализ современного состояния технологии переработки пиритных медных, медно-цинковых, свинцово-цинковых и медно-свинцово-цинковых руд. Выделены основные технологические особенности вещественного состава, которые позволяют относить руды к труднообогатимому минеральному сырью.

Описаны существующие и разработаны усовершенствованные технологические схемы рудоподготовительных операций, флотационных и химико-металлургических процессов; определены тенденции в разработке и применении селективных реагентных режимов с использованием новых собирателей. Выявлена взаимосвязь между основными свойствами минералов и технологическими схемами, режимами и показателями переработки руд цветных металлов.

Развитие минерально-сырьевой базы определяется потребностями экономики и состоянием техники и технологии горно-перерабатывающих комплексов [1, 2, 3, 4].

Наиболее востребованными среди цветных тяжелых металлов являются медь, свинец, золото, металлы платиновой группы (МПГ). К распространенным типам месторождений руд цветных металлов относят – колчеданные сульфидные и вкрапленные медно-цинковые, пиритные свинцово-цинковые полиметаллические и др. Запасы большинства разрабатываемых месторождений богатых и легкообогатимых руд ежегодно сокращаются, а в переработку на обогатительные фабрики поступают труднообогатимые руды.

Отличительными особенностями руд являются низкое содержание ценных компонентов; сложный и непостоянный минеральный и фазовый состав; неравномерная вкрапленность полезных минералов от крупнозернистых мономинеральных фракций до тонкодисперсных и наноразмерных рудных зерен при тесном их срастании друг с другом, с сульфидами железа и породными минералами; наличие различных

структурно-текстурных рудопоявлений – кристаллической, скрыто-кристаллической, метаколлоидной, колломорфной, эмульсионной в виде твердых растворов, брекчиевидной, вкрапленной, полосчатой, сплошной, массивной и в других формах.

Наиболее сложную проблему для селективной флотации представляет преобладание в рудах различных сульфидов железа над содержанием сульфидов цветных металлов. Во многих типах руд содержание пирита достигает 90 %; в отдельных рудах содержание пирротина преобладает над пиритом в два раза и составляет 50–60 %. Успешная селективная флотация руд зависит также от соотношения активированной, неактивированной разновидностей сфалерита, содержания примесных компонентов в мартите, гюбнерите, клеофане. Значительное влияние на разделение минералов оказывает наличие в рудах теннантита, вторичных сульфидов меди и окисленных минералов.

Колчеданные медно-цинковые руды в наибольшей степени вовлечены в переработку, на их долю приходится 20–30 % от общих запасов и добычи меди в России. Руды являются комплексными, так как промышленную ценность, кроме основных минералов меди, цинка, имеют благородные (золото, серебро, платиноиды), редкие, редкоземельные металлы. Технология переработки руд в обогащении и металлургии предусматривает попутное извлечение основных, драгоценных и редких металлов. Медно-цинковые пиритно-пирротиновые золотосодержащие руды наибольшее распространение имеют в Уральском регионе, содержат широкий спектр рудных и породных минералов. Содержание меди колеблется в широких пределах от 0,7 до 3 % при содержании цинка от 0,7 до 3,5 % и более. Основная доля меди в рудах представлена халькопиритом. Содержание вторичных сульфидов и окисленных минералов меди изменяется до 30 %, содержание теннантита и тетраэдрита – до 25 % от общей массы меди. Вследствие тонкодисперсной взаимосвязи сульфидов меди с сульфидами железа и сфалерита, а также высокой флотоактивности разновидностей минералов, получение качественных медных и цинковых концентратов является достаточно сложной задачей. Потери металлов с пиритным концентратом и пиритсодержащими продуктами достигают: Cu – 20 %, Zn – 40 %, Au – 90 %, Ag – 50–70 %, потери цинка с медным концентратом 30–40 %.

Анализ причин потерь металлов показывает, что высокие потери обусловлены тонкими сложными сростками сульфидов цветных металлов с пиритом и пирротинном (с размером $-100 + 10$ мкм и менее), а также в значительной степени свободными, весьма тонко дисперсными зернами ($-20 + 5$ и менее мкм), что указывает на несовершенство схем и режимов измельчения и флотации. Раскрываемость [11, 12]

сростков пирита, сульфидов меди и цинка, самородного золота неодинаковая. Вторичные и окисленные минералы вместе с крупнокристаллическим и корродированным пирротинном, халькопиритом раскрываются в первых стадиях измельчения, в то время как тонкокристаллические зерна этих минералов раскрываются в третьей стадии, в которой крупнокристаллические раскрытые и имеющие склонность к ошламованию минералы, переизмельчаются. Проблема выделения пирита и других сульфидов, их модификаций, разновидностей из технологического цикла, является существенным фактором и резервом в повышении показателей селективной флотации [8]. Супертонкое измельчение колчеданных руд цветных металлов в Isomill, Vertimill не обеспечивает высоких результатов селективной флотации сульфидов меди и цинка вследствие образования вторичных шламов и резкого роста флотационной активности зерен пирита и сфалерита в результате окисления сульфидов и выделения катионов меди. Флотоактивность пирита и других сульфидных минералов при использовании бутилового ксантогената в качестве собирателя сопоставима; высшие ксантогенаты по отношению к сульфидам железа не являются селективными собирателями. Флотационное разделение коллективных сульфидных медно-цинковых концентратов представляет собой сложную технологическую задачу. Альтернативным решением может быть использование гидрометаллургических процессов, однако эти процессы, являясь высокоэффективными, значительно дороже самых затратных обогатительных процессов и в экологическом плане не безопасны.

Современные технологические исследования обогащения колчеданных медно-цинковых руд направлены на изыскание развитых рациональных гравитационно-флотационных схем с выбором композиций сульфгидрильных собирателей, которые решают задачи: фракционного выделения разновидностей одного и того же минерала в начале технологического процесса; снижения флотируемости пирита, пирротина с размыканием цикла флотации и выделением их в отвальные хвосты или промпродукты; дополнительного вывода сульфидов железа в пиритные концентраты или в отвальные хвосты; введения доводочных операций с выделением сульфидов цветных металлов, а черновые концентраты в разных стадиях флотации в соответствии с технологическими свойствами минералов. Выделение минералов различной крупности по мере их раскрытия, создание оптимальных схем и режимов отделения вторичных минералов меди и других быстрофлотирующихся фракций медных минералов в межцикловых операциях в отдельные продукты в начале рудного цикла создают благоприятные условия для селективной флотации минералов меди, цинка, пирита и пирротина.

Для труднообогатимых пирит-пирротиновых медно-цинковых руд Тарньерского, Ново-Шемурского, Подольского, Узельгинского, Сафьяновского, и др. месторождений Уральского региона разработаны и внедрены различные технологические схемы [9, 10] обогащения медных, медно-цинковых руд – прямая селективная флотация и различные варианты коллективно-селективных схем.

Разновидности сфалерита, величины цинкового модуля (отношение исходного содержания цинка к исходному содержанию меди), наличие железистого сфалерита требует специальной доводки черного цинкового концентрата. Успешная депрессия сфалерита зависит от концентрации сульфид-иона в операциях десорбции собирателя, в селекции коллективного концентрата и значений pH. Лучшая депрессия сфалерита достигается при использовании сочетаний бисульфита, сульфида, сульфита, тиосульфата натрия в различном соотношении, часто с цинковым купоросом [11–13]. Практика обогащения показала, что природноактивный и легкофлотирующийся сфалерит крупностью 0,2–0,005 мм с эмульсионной вкрапленностью минералов меди содержит изоморфную медь и железо в 3–5 раз выше, чем неактивированная разновидность. В первой стадии селекции коллективного медно-цинкового концентрата в режиме «мягкой» депрессии подавляют флотацию неактивированного сфалерита при флотации минералов меди и часть природоактивированного сфалерита; затем из камерного продукта медной флотации после активации сфалерита проводят цинково-медную флотацию с последующими перечистками черного цинкового концентрата. Во второй стадии селекции в режиме «жесткой» депрессии активированного сфалерита ведут Cu-FeS₂ флотацию при более высоких расходах подавителей с предварительной десорбцией собирателя. Оптимальные значения pH при селекции в медной флотации регулируется расходом извести, сульфата цинка, сульфида натрия и составляет 7,5–9,5.

Повышение качества цинкового концентрата, полученного в камерном продукте, достигается при условии содержания цинка в черном концентрате не менее 10–12 % и пирита не более 25 %.

Значительные проблемы в селективной флотации представляют пирротино-пиритные медно-цинковые руды Тарньерского месторождения, в которых содержание пирротина достигает 70 % от общей массы рудных минералов при меньшем содержании пирита. При содержании пирротина до 20 % применяют простой технологический способ аэрации в известковой среде перед коллективно-селективной флотацией с последующей флотацией бутиловым ксантогенатом, что позволяет получать удовлетворительные показатели флотации. Использование режима аэрации и слабых по отношению к пириту, пир-

ротину и неактивированному сфалериту сульфидрильных собирателей типа МТФ в сочетании с бутиловым ксантогенатом позволяет улучшать селективность флотации. При этом в начале в рудной флотации выделяется медная «головка», а из камерного продукта коллективного цикла флотируют сфалерит с возвратом хвостов перекистки в рудную флотацию, это значительно сокращает циркуляцию пиритно-пирротиновых промпродуктов.

Важной проблемой является присутствие в некоторых рудах теннантита, флотируемость которого в известковой среде ниже, чем других сульфидов меди, что снижает общее извлечение меди. Повышенное содержание теннантита способствует концентрации мышьяка в медном концентрате до 1 %, что усложняет технологию его пирометаллургической переработки; требуется утилизация мышьяка из отходящих газов. Значительную часть теннантита можно выделить в отдельный медно-мышьяковистый концентрат, подбирая селективные собиратели, депрессоры и регуляторы [14].

Для повышения извлечения металлов разработаны и реализованы технологические схемы с фракционным флотационным выделением монометаллических концентратов в различных циклах измельчения и флотации в соответствии с технологическими свойствами минералов (рис. 1).

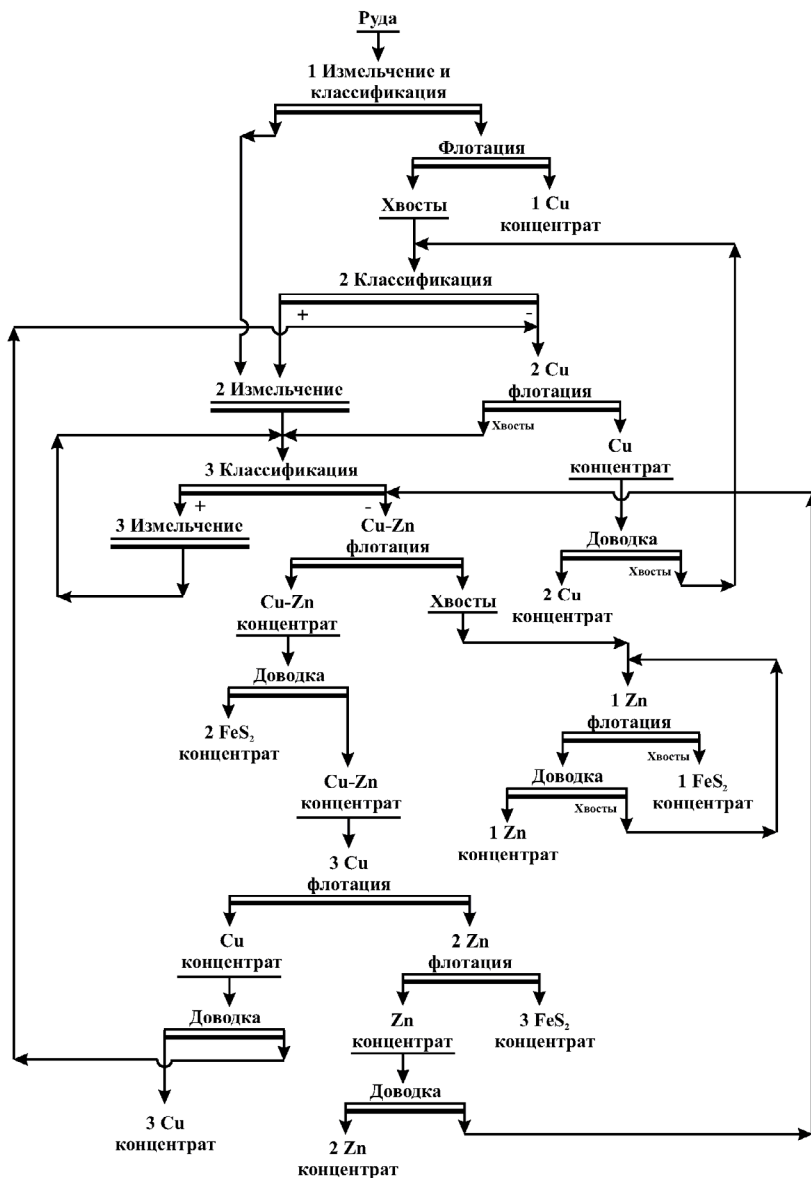


Рис. 1. Принципиальная схема комплексной переработки колчеданных медно-цинковых руд

Для комплексной переработки руд разработана технология с получением на стадии обогащения богатых концентратов и трудно-разделяемых классическими способами полиминеральных продуктов для гидрометаллургии (рис. 2). Для бедных продуктов перспективными могут быть хлорные процессы, интенсивное чановое, кислотное или биовыщелачивание; для богатых – автоклавные способы, кислотное выщелачивание с предварительным обжигом. Золото в рудах Уральского региона в основном ассоциировано с пиритом, свободного золота – не более 20 %.

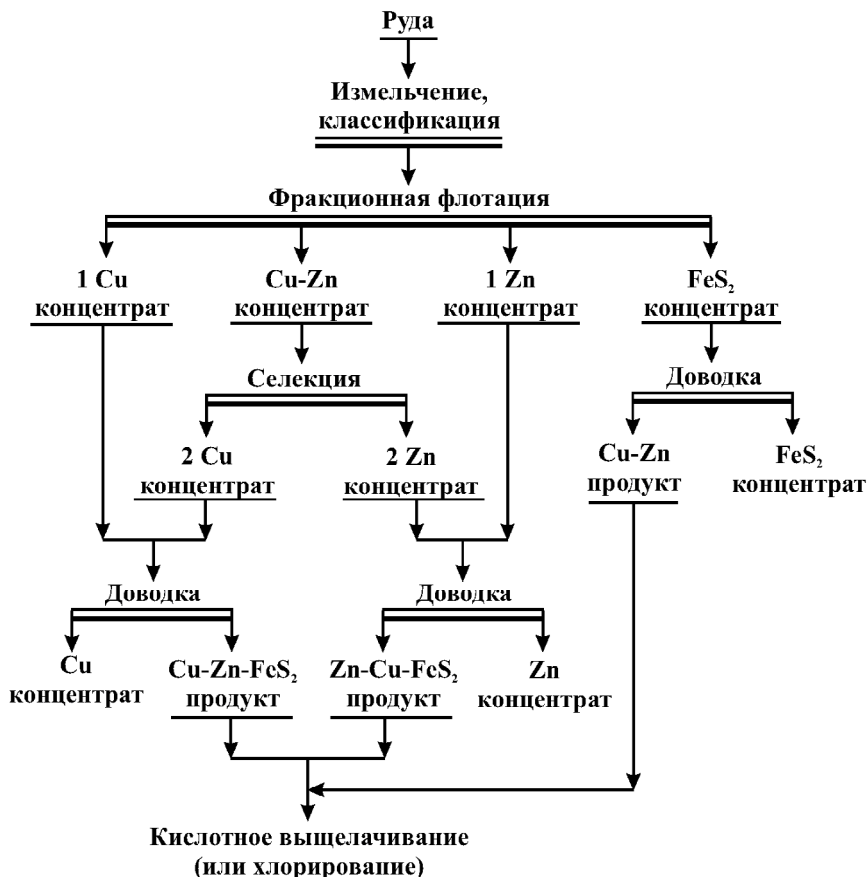


Рис. 2. Принципиальная схема селективной флотации колчеданных медно-цинковых руд с фракционным выделением концентратов

Извлечение золота в медный концентрат возрастает с увеличением выхода концентрата и извлечения в него серы (пирита), что приводит к снижению содержания меди в концентрате до 15 %. В связи с этим повышение качества медного концентрата сопровождается потерями золота с пиритсодержащими хвостами. Дополнительное извлечение золота может быть достигнуто при межстадиальном гравитационном обогащении с применением центробежных концентраторов и концентрационных столов, либо из золотопиритных хвостов с применением комбинированных гравитационно-флотационно-химико-металлургических технологий.

Сульфидные полиметаллические свинцово-цинковые и медные свинцово-цинковые руды вследствие сложного минерального, химического, фазового состава и близостью технологических свойств сульфидных минералов, легкой шламуемостью галенита, также считаются труднообогащаемыми и имеют отличительные технологические особенности. Например, свинцово-цинковые руды Озерного месторождения имеют тонкую вкрапленность галенита и других минералов, значительное количество пирита и окисленных минералов. Для вкрапленных и колчеданных сульфидно-окисленных руд и черновых концентратов предложены комбинированные технологии с выделением на стадии обогащения богатых селективных концентратов и промпродуктов с последующей переработкой по гидрометаллургическим схемам, как и для медно-цинковых руд [19]. Руды содержат свинца 1 %, цинка до 6 %, и серы 25 % и более, текстура пирита аморфная, колломорфная, почковидная, кольцевая. Степень окисленности сульфидов неравномерная. В руде преобладают структуры с тонким взаимным прорастанием пирита, галенита, сфалерита, карбонатов с размером сростков от десятых долей до сотых долей (0,01–0,04 мм). Для галенита – основного носителя серебра – характерны сростки с пиритом в колломорфных структурах, галенит имеет размер 5–10 мкм, сростки которых практически не раскрываются, что не позволяет получить качественный свинцовый концентрат, а также из-за высокого содержания в сфалерите и галените изоморфного железа в связи с этим содержание основных металлов ниже по сравнению со стехиометрией на 5–10 %. Извлечение свинца из руд определяется соотношением свинца и цинка в руде; чем больше эта величина, извлечение снижается до 50 %. В МИСиС разработана технологическая схема с межцикловой Pb-Zn флотацией после первой стадии измельчения; основной и контрольной Pb-Zn флотацией после второй стадии измельчения, основной и контрольной цинковой флотацией, пересчитанными операциями с доизмельчением черновых концентратов. В свинцово-

цинковый продукт извлечение свинца составляет 80–88 %, цинка 40–45 %, серебра 65–80 %, который целесообразно перерабатывать по гидрометаллургической схеме. В цинковый концентрат извлечение составило 55–65 %. Получение свинцового концентрата проблематично, так как галенит имеет неравномерную тонкодисперсную вкрапленность в пирите, сфалерите, породных карбонатных минералах, часто с ячеистой структурой, покрытым пленками церрусита; в связи с этим при флотации галенит переходит в пенные продукты всех циклов, пропорционально выходам пенных продуктов.

Полиметаллические руды Рубцовского, Степного, Таловского, Корбалихинского и других месторождений имеют сложные текстурно-структурные характеристики – от кристаллической, до коррозионной и скелетной. Для руд Рубцовского месторождения разработана схема полной коллективно-селективной флотации с невысокими показателями; для руд Таловского и Степного месторождений предложена схема с выделением в начале медно-свинцового, а затем цинкового и пиритного концентратов. Разделение сульфидного коллективного концентрата осуществляется по схеме: медно-свинцовая флотация с депрессией сфалерита и пирита Na_2SO_3 и ZnSO_4 в слабощелочной среде ($\text{pH} = 8,5\text{--}9,5$); медно-свинцовый концентрат разделяется также по бесцианидному режиму с десорбцией собирателя сернистым натрием, активированным углем с использованием депрессоров – сульфита и тиосульфата натрия с сульфатом железа при $\text{pH} = 5,0\text{--}5,5$. Цинковый цикл проводится по классической схеме и режиму в высокощелочной известковой среде с бутиловым ксантогенатом. Полученные концентраты содержат меди в медном 25,0 % при извлечении 72,0 %; свинца в свинцовом 46,0 % при извлечении свинца 81 %; цинка в цинковом 52,8 % при извлечении 73,0 %.

В процессе переработки сложных руд цветных металлов в хвостохранилищах обогатительных фабрик накопились сотни миллионов тонн пиритных хвостов, в которых содержатся тысячи тонн цветных и благородных металлов.

Необходимость в использовании техногенных пиритных хвостов и других пиритсодержащих продуктов, выделяемых при обогащении сложных медно-цинковых руд возникла в связи со снижением объемов добываемых легкообогатимых и богатых руд и уменьшением выпуска товарных концентратов для металлургического производства меди, цинка, золота и серебра. Рентабельная разработка техногенных месторождений и их комплексное обогащение возможна при решении ряда технологических и организационных задач, связанных: с инвентаризацией техногенных хвостов, геологотехнологическим картированием

богатых и бедных участков и созданием рациональных технологий переработки с использованием современных способов извлечения основных ценных компонентов в товарные продукты высокого качества.

Анализ технологии использования техногенных хвостов и выполненные исследования позволяет сделать некоторые технологические выводы для практической реализации основных направлений рационального выбора процессов переработки пиритных «лежалых» хвостов: Во-первых, техногенные хвосты – источник экологической опасности и значительный резерв компенсации и увеличения выпуска металлов; во-вторых, значительная часть металлов в различных минеральных формах распределена в тонкие классы крупностью $-0,03$ мм, концентрация которых в разных зонах хвостохранилищ неравномерная как по глубине, так и по простиранию (по площади) техногенного массива, что усложняет задачу селективной выемки наиболее богатых и благоприятных для обогащения участков техногенного месторождения; в-третьих, при продолжительном хранении техногенных хвостов под действием климатических, сезонных и временных факторов взаимодействие компонентов техногенной пиритной массы, привело к образованию новых минеральных фаз со сложной окисленной структурой, для которых необходимо применение комплекса физико-химических и энергетических воздействий; в-четвертых, в отечественной и за рубежной печати отсутствует информация прямого использования пиритных хвостов с выделением селективных концентратов с извлечением в них цветных и благородных металлов.

Техногенные пиритные хвосты в сравнении с другими техногенными минеральными объектами являются более сложными и труднообогащаемыми. Техногенные пиритные продукты с большой активностью подвержены изменению технологических свойств, чем рудное сырье на складах, при рудоподготовке и флотации. Окисление пирита и других сульфидов интенсифицируется вследствие тесного взаимодействия тонкодисперсных микрогальванопор, состоящих в основном из пирита и других компонентов твердой фазы (сульфидов меди, частиц золота, формы соединений железа и др.). По распределению минералов доля тонких классов крупности техногенных хвостов превышает 20 % в сравнении с рудным материалом. Концентрация тиосульфатных, сульфитных, сульфатных и полиитонатных ионов в связи с более активным окислением сульфидов значительно превышает концентрацию ионного состава рудного материала. Ионно-молекулярный состав жидкой фазы влияет на формирование соединений на разделяемых минералах и электрохимическое состояние пиритной пульпы. Оптимальный состав пульпы способствует повышению контрастности свойств разде-

ляемых минералов, а различия в окислении сульфидных минералов в условиях изменения рН-среды, температуры, концентрации кислорода, других окислителей позволяют определить эффективные режимы разделения минералов.

В работах показана принципиальная технологическая возможность фракционного выделения минералов цветных металлов и золота в концентраты и продукты в соответствии с технологическими свойствами [1, 7, 11]. Изучение вещественного состава техногенного сырья позволило определить оптимальные условия гравитационного выделения частиц самородного свободного золота и его открытых сростков в золото-содержащий продукт; подобрать режим фракционирования и концентрирования минералов меди, цинка, пирита в отдельных продуктах с последующей их доводкой по индивидуальным технологическим схемам с использованием процессов обогащения и гидрометаллургии.

Наиболее применяемым способом для более полного разложения пирита с освобождением законсервированных в нем золота и сульфидов цветных металлов является процесс хлорной металлургии, освоенный на заводах ФРГ, Испании, Японии; процесс отработан Гинцветметом на Рязанском опытном заводе. Эффективными и конкурирующими являются способы кислотного выщелачивания, биоокисления и других видов воздействия [15, 16, 17].

Выводы

1. Выполнен анализ состояния технологии различных типов сложных руд цветных металлов и техногенных продуктов, которые в основном определяются генезисом месторождений и соответственно технологическими особенностями минералов.

2. Исследованы и рекомендованы развитые флотационные и комбинированные развитые комбинированные флотационно-химико-гидрометаллургические схемы на основе технологических особенностей минералов разных модификаций с использованием селективных сульфгидрильных собирателей и модификаторов с размыканием перечистных и доводочных операций с выделением фракционных концентратов и продуктов в отдельных циклах, выведением их из процесса для раздельной переработки, которые значительно увеличивают комплексность использования сложных колчеданных и сульфидно-окисленных пиритных медно-цинковых, полиметаллических руд и техногенного сырья.

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантов РНФ № 14-17-00393 и РФФИ № 14-05-00232.

1. *Чантурия В. А.* Перспективы устойчивого развития горноперерабатывающей индустрии России // Горный журнал. 2007. № 2. С. 2–9.
2. *Арсентьев В. А., Баранов В. Ф., Вайсберг Л. А.* Современное состояние и перспективы развития процессов дробления и измельчения минерального сырья // Горный журнал. 2007. № 2. С. 10–14.
3. *Сазонов Г. Т.* Состояние металлургической промышленности России // Обогащение руд. 2010. № 6. С. 3–8.
4. Оценка перспектив развития горно-металлургической базы ряда металлов в Российской Федерации / А. М. Птицын, Ю. К. Дюдин, А. Н. Синдарский, Б. П. Руднев. М.: Изд. дом «Руда и металлы». 2002. 562 с.
5. *Бочаров В. А.* Техногния обогащения полезных ископаемых : в 2-х т. / В. А. Бочаров, В. А. Игнаткина. М.: Изд.дом «Руда и металлы», 2007. Т. 1. 470 с. ; Т. 2. 406 с.
6. *Бочаров В. А, Игнаткина В. А.* К вопросу изучения влияния генетических особенностей разновидностей пирита и его структурных ассоциаций на контрастные и технологические свойства // Горный журнал. 2014. № 5. С. 14–20.
7. *Бочаров В. А, Игнаткина В. А.* Схемы флотации сульфидов цветных металлов на основе использования сочетания селективных собирателей // Горный журнал. 2010. № 12. С. 58–64.
8. *Бочаров В. А.* Влияние минерального состава сульфидов и их модификаций на выбор схемы и собирателей селективной флотации руд цветных металлов / В. А. Бочаров, В. А. Игнаткина, Д. А. Алексейчук // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2012. № 4. С. 3–10.
9. *Бочаров В. А, Игнаткина В. А., Хачатрян Л. С.* Проблемы разделения минеральных комплексов при переработке массивных упорных руд цветных // Цветные металлы. 2014. № 5. С. 11–16.
10. *Бочаров В. А, Игнаткина В. А., Абрютин Д. В.* Технология переработки золотосодержащего сырья. М.: Изд. дом «МИСиС», 2011. 326 с.
11. *Бочаров В. А, Игнаткина В. А.* К вопросу изучения влияния генетических особенностей разновидности пирита и его структурных ассоциаций на контрастности и технологические свойства // Горный журнал. 2014. № 5. С. 14–20.
12. *Бочаров В. А, Игнаткина В. А.* Флотационные свойства сфалерита и сульфидов меди колчеданных руд // Горный журнал. 2014. № 12.
13. *Бочаров В. А, Игнаткина В. А., Дьячков Ф. Г.* Повышение контрастности флотационных свойств сульфидов цветных металлов полиметаллических руд с использованием сульфидрильных собирателей различной молекулярной структуры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 6. С. 161–170.

14. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Каюмов А. А. Проблема флотационного обогащения блеклых руд и направления ее решения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 3 (в печати).

15. Бочаров В. А., Мынцевич М. И., Захаров Б. А. Состояние и перспективы развития технологии комплексной переработки руд цветных металлов // Цветные металлы. 2007. № 2. С. 65–71.

16. Комплексная переработка полиметаллического сырья на основе хлоридовозгоночного обжига / М. С. Зак, Е. Ф. Чехова, Е. В. Каримов и др. // Труды Гинццветмета. 1990. С. 2–6.

17. Галушенко В. В., Багрова Т. А., Тарасов А. В. Переработка пиритных золотосодержащих концентратов // Труды Гинццветмета. 1993. С. 46–49.

18. Манцевич М. И., Мызенков Ф. А. Разделение медно-цинковых продуктов путем селективного обжига и флотации // Труды Гинццветмета. 1988. С. 38–42.

19. Мечев В. В., Бочаров В. А., Щербаков В. А. Основные направления переработки руд цветных тяжелых металлов с применением комбинированных процессов // Труды Гинццветмета. 1988. С. 3–11.

20. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Чантурия Е. Л. Основные направления решения проблем комплексной переработки пиритных хвостов флотации медно-цинковых руд // Цветные металлы. 2011. № 12. С. 20–26.

21. Комплексная переработка пиритсодержащих хвостов флотации медно-цинковых руд / В. А. Бочаров, В. А. Игнаткина, Е. Л. Чантурия и др. // Горный журнал. 2013. № 12. С. 68–71.

22. Макаров Д. М. Теоретическое и экспериментальное обоснование химических превращений сульфидов в техногенных отходах и изучение влияния продуктов окисления на технологические свойства : дис. ... докт. тех. наук / М.: ИПКОН РАН, 2006.

23. Козин В. З., Морозов Ю. П., Корюкин Б. М. Хвосты и хвостохранилища обогатительных фабрик // Горный журнал. 1994. № 5. С. 111–116.

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ТИПА Fe-C-Cr-Ti-Al

В. С. Верхорубов, Ю. С. Коробов, М. А. Филиппов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Рассмотрено влияние плазменного оплавления на микроструктуру напыленных покрытий из порошковых проволок системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Al. Представлены результаты исследований структуры и микротвердости покрытий до и после плазменного оплавления.

The effect of the plasma remelting on microstructure of arc sprayed coatings from Fe-C-Cr-Ti-Al cored wires was examined. The results of studies of microstructure and hardness of coatings before and after plasma remelting are presented.

Введение

Для повышения ресурса узлов оборудования, работающих в условиях абразивного изнашивания эффективно применяются напыленные покрытия из порошковых проволок ППМ-6 системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Al [1] и ее модификация ППМ-8 [2], обладающая большей износостойкостью. Однако условия формирования ДМ-покрытий обуславливают ряд характерных дефектов, к числу которых можно отнести сравнительно низкую адгезию к основному металлу (20–35 МПа), пористость и неоднородность структуры. В условиях абразивного изнашивания и трения скольжения без смазки наблюдается интенсивная потеря массы покрытия в результате микрорезания, при попадании абразивных частиц в поры покрытия, и когезионного отрыва отдельных частиц и конгломерированных участков покрытия, в зонах покрытия с ослабленной когезионной прочностью [3, 4]. Также пористость покрытий может привести к началу коррозионных процессов на границе основа–покрытие. Наличие оксидных прослоек и маленькая площадь контакта как между частицами, так и между частицами и подложкой приводит к отслаиванию покрытия под воздействием ударных нагрузок. Для улучшения сцепления напыленных покрытий и снижения пористости их подвергают последующему оплавлению концентрированными источниками нагрева [5–9]. По критериям стоимости, мобильности и универсальности оборудования наиболее перспективными являются плазменные источники нагрева [10].

Данная работа проводилась с целью определения влияния плазменного оплавления на структурные характеристики покрытий, получен-

ных методом активированной дуговой металлизации из порошковых проволок системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Al.

Методы исследований

В качестве основы для нанесения покрытий были использованы пластины из качественной стали 40 размерами 240×70×10. Напыляемый материал – порошковая проволока марки ППМ-8 Ø 2 мм состава 80X22Т2Ю2.

Перед нанесением покрытия производили дробеструйную обработку поверхности пластины. Параметры дробеструйной обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры предварительной дробеструйной обработки

Абразив	Дистанция, мм	Давление воздуха, МПа	Угол атаки, град.
Дробь чугунная колотая ДЧК 1-1,2 по ГОСТ 11964-81	150	0,6	70–90

Для нанесения покрытий толщиной 1,7–2 мм использовали аппарат активированной дуговой металлизации АДМ-10 [11]. Напыление производилось под прямым углом к поверхности изделия, на параметрах, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Параметры режима активированной дуговой металлизации

Ток, А	Напряжение, В	Скорость перемещения пистолета, м/ч	Дистанция напыления, мм	Давление воздуха, МПа	Давление пропана, МПа
200	28	360	100	0,30	0,32

Оплавление металлизационного покрытия осуществляли на оборудовании для плазменной поверхностной обработки [12]. В качестве защитного и плазмообразующего газа использовался аргон. Параметры режима плазменной обработки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры режима плазменного оплавления

Ток, А	Диаметр сопла, мм	Скорость обработки, м/ч	Дистанция обработки, мм	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Расход защитного газа, л/мин
160	4	6	5	2,5	4,5

Из пластины с нанесенным металлизационным покрытием до и после плазменного оплавления с помощью электроэрозионного проволочно-вырезного станка AGIE CHARMILLES CUT 20 были вырезаны образцы размерами 10×10×10 мм. Подготовка шлифов для проведения металлографических исследований напыленных и оплавленных покрытий выполняли на станке Laborol с использованием пасты ГОИ № 2 и алмазной пасты НОМ 60/40. Травление образцов выполнялось царской водкой.

Микроструктурные исследования выполнены на металлографическом микроскопе Альтами, микротвердость с поверхности покрытий и по их сечению измеряли на микротвердомере Shimadzu HNV-G21DT при 0,5 Н (50 гс) и 3 Н (300 гс).

Результаты и их обсуждение

Металлизационное покрытие имеет слоистую структуру (рис. 1), характерную для напыленных покрытий, и состоит из сильно деформированных зерен – ламелей толщиной 5–10 мкм. Толщина покрытия на шлифе – 1840 мкм. Видно, что оно характеризуется значительной неоднородностью структуры, наличием пор и несплошностей. Трещин в покрытии не обнаружено. Граница между покрытием и основанием имеет характерный зигзагообразный вид. В процессе напыления произошло хорошее соединение с основанием, о чем говорит отсутствие темной оксидной прослойки на границе покрытия с основой.

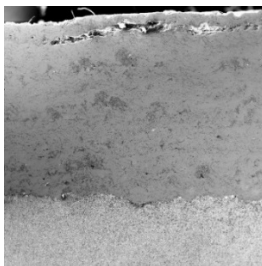


Рис. 1. Макрошлиф напыленного АДМ-покрытия (×50)

Травление выявляет несколько характерных цветов и оттенков структурных составляющих (рис. 2). Покрытие представляет собой тонкие чередующиеся волнообразные прослойки белого, серого и черного цвета, различной величины и конфигурации. Также наблюдаются включения довольно крупных частиц более округлой и глобулярной формы (см. рис. 2, б). Кроме того, присутствуют поры глобулярной и дискооб-

разной формы. Очевидно, что участки темно-серого и черного цвета являются оксидными прослойками. Слабое воздействие травителя на белые структурные составляющие говорит о том, что это металлическая матрица с большим содержанием легирующих элементов. Данные металлические фрагменты представляют собой твердый раствор хрома в аустените и мартенсите. В наиболее крупных частицах покрытия наблюдается структура точечного характера, похожая на отпущенный мартенсит с включениями дисперсных карбидов.

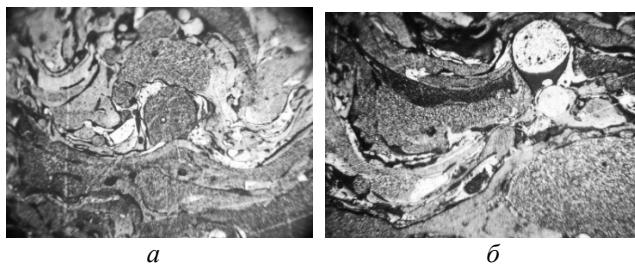


Рис. 2. Микроструктура напыленного АДМ-покрытия ($\times 1000$)

Плазменная поверхностная обработка напыленного покрытия привела к его полному переплаву и устранению структурных неоднородностей (рис. 3). Толщина переплавленного покрытия – 2380 мкм. По изменению толщины покрытия можно заключить, что смешение с основой после плазменного оплавления составляет примерно 30 %.

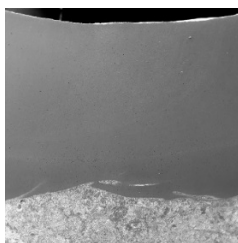


Рис. 3. Макрошлиф металлизационного покрытия после плазменного оплавления ($\times 50$)

Оплавленное покрытие имеет однородную структуру, в которой, на первый взгляд, отсутствуют оксидные фазы, в большом количестве имевшиеся в исходном напыленном покрытии. Однако на снимке поперечного сечения нетравленного образца при увеличении в 1000 раз видны

черные включения круглой формы размером до 2 мкм (см. рис. 4, *а*), предположительно оксидов. На снимке протравленного образца видно, что данные включения и карбиды, располагаются преимущественно в эвтектике, по границам зерен (см. рис. 4, *б*). Очевидно, это связано с тем, что при кристаллизации данные включения выталкиваются в жидкую фазу, а эвтектика кристаллизуется в последнюю очередь.

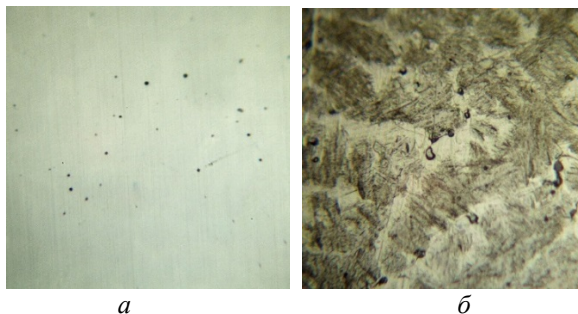


Рис. 4. Поперечный шлиф оплавленного покрытия ($\times 1000$):
а – до травления, *б* – после травления

Изучение поперечных шлифов показало, что зона сплавления и ЗТВ имеют типичный для наплавленных покрытий вид (рис. 5, *а* и *б*). В прилегающем к оплавленному покрытию слое основного металла наблюдается тонкая (50 мкм) зона обезуглероживания (см. рис. 5, *б*). При большом увеличении по всему сечению покрытия наблюдается игольчатая структура мартенсита (см. рис. 4, *б*). Структура переплавленного покрытия имеет дендритное строение и состоит из четырех основных характерных зон в порядке их расположения от основного металла к поверхности оплавления (см. рис. 5, *а*):

1. К основной стали примыкает зона мелкозернистого переплавленного покрытия толщиной 50–150 мкм, состоящего из равноосных зерен 8–9 баллов.

2. К 1-й зоне примыкает тонкий слой до 50 мкм равноосных зерен несколько более крупнозернистого (6–7-го балла) металла. 1-я и 2-я зоны по структуре представляют собой пакетный мартенсит, характерный по морфологии для мало- и среднеуглеродистых сталей с содержанием углерода до 0,5–0,6 % [13], содержащий выделения дисперсных карбидов. Вследствие малой толщины 1-й и 2-й зон их строение показано на одном рис. 5, *б*.

3. 1-я и 2-я зоны равноосных зерен переходят в основную зону вытянутых столбчатых зерен длиной до 500 мкм (см. рис. 5, *в*), ориен-

тированных преимущественно перпендикулярно или под небольшим углом к поверхности раздела переплавленного и основного металла. Структура зерен представляет собой пакетный мартенсит одной-двух ориентировок, окруженный тонкой оболочкой карбидной эвтектики.

4. Верхняя часть переплавленного покрытия (см. рис. 5, *з*) толщиной до 500 мкм состоит из равноосных зерен размером 20–50 мкм, состоящих из мартенсита с выделением дисперсных карбидов.

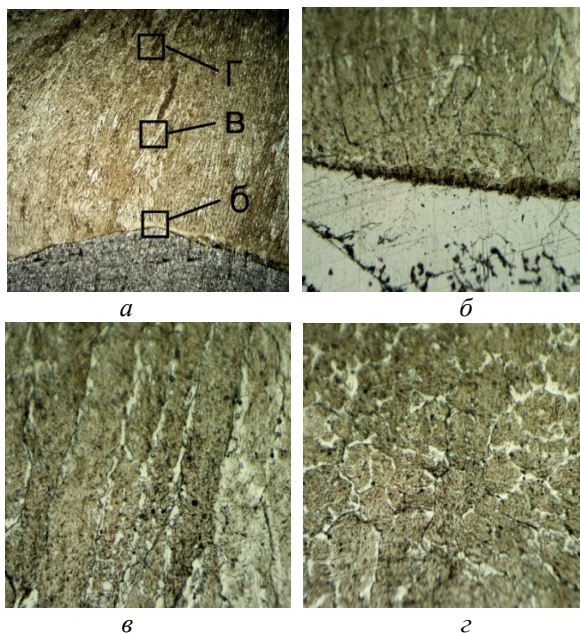


Рис. 5. Микроструктура оплавленного покрытия после травления: *а* – общий вид ($\times 40$); *б* – переходная зона ($\times 400$); *в* – столбчатый слой ($\times 400$); *з* – поверхностный слой ($\times 400$)

Такая разница в структуре оплавленного покрытия обуславливается различием скоростей охлаждения и направлением теплоотвода по толщине покрытия. Примыкающая к основе нижняя зона быстро кристаллизуется в результате отвода тепла в подложку, с высоким коэффициентом теплопроводности, приводя к образованию мелких равноосных зерен (зона 1). Далее скорости охлаждения уменьшаются и происходит рост зерна (зона 2). Ближе к середине расплавленного покрытия скорости охлаждения еще ниже, охлаждение имеет направленный характер в сторону подложки, вследствие чего образуется структура вытянутых,

вертикально направленных дендритов (зона 3). В результате равномерного прогрева оплавленного слоя у поверхности покрытия направленное охлаждение металла уменьшается, что приводит к образованию крупных равноосных зерен (зона 4). Рассмотрев строение оплавленного покрытия, можно сделать вывод, что процесс его кристаллизации напоминает кристаллизацию слитка в изложнице [13].

Изучение структуры полученных покрытий дополнено замерами микротвердости по толщине покрытий от поверхности до основы (рис. 6). В поле исследования попадали участки как чистого металла, так и оксидных прослоек в металлизационном покрытии.

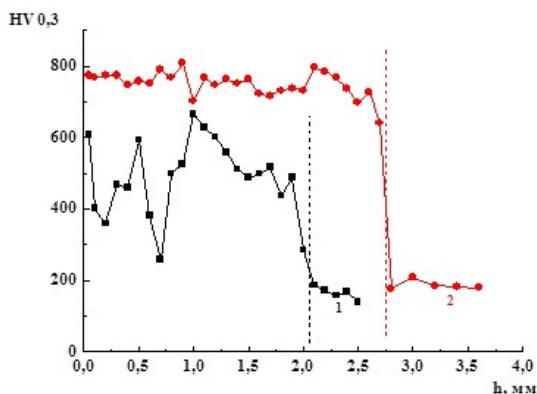


Рис. 6. Изменение микротвердости по толщине покрытия в исходном (1) и оплавленном (2) состоянии при нагрузке на индентор 300 гс

Исходное покрытие, полученное методом АДМ, характеризуется значительной неравномерностью микротвердости по толщине покрытия, что свидетельствует о наличии пор, несплошностей, структурных и фазовых неоднородностей. Значения микротвердости меняются в пределах от 200 до 650 HV. При этом микротвердость, измеренная при нагрузках 50 и 300 гс, имеет близкие значения.

Существенное изменение структуры покрытия после оплавления привело к значительному повышению микротвердости до 800 HV_{0,3} (см. рис. 6). При этом отмечается ее более равномерное распределение по толщине покрытия, что обусловлено однородной структурой покрытия, отсутствием оксидных прослоек, пористости и несплошностей, а также равномерным распределением химических элементов в покры-

тии с образованием дисперсных упрочняющих фаз. Однако при снижении нагрузки на индентор наблюдается повышение среднего значения микротвердости от 753 HV_{0,3} до 831 HV_{0,05}. Это объясняется наличием рассмотренных ранее (см. рис. 4, а) структурных микронеоднородностей в оплавленном покрытии. При повышении нагрузки на индентор большее число неоднородностей попадает в исследуемую область, что приводит к снижению среднего уровня твердости. Следовательно, наблюдаемые микронеоднородности имеют твердость ниже, чем основной металл.

Такое значительное повышение твердости, очевидно, связано с образованием плотной мартенситной структуры покрытия. Также можно отметить, что, исходя из представленных графиков, плазменная обработка не оказывает влияния на твердость основы.

Выводы

1. Неравномерность распределения микротвердости по толщине покрытия обусловлено значительной неоднородностью структуры, характеризующейся наличием пор, несплошностей и оксидных прослоек.

2. Плазменная обработка металлизационного покрытия приводит к его полному переплавлению, существенному изменению структуры и равномерному распределению химических элементов. Образование кристаллов мартенсита внутри дендритных зерен и уплотнение покрытия приводит к повышению средней микротвердости по толщине покрытия на 40 %. Однако в покрытии сохраняется некоторая неоднородность в виде микроскопических оксидных включений округлой формы.

Благодарность

Коллектив авторов выражает благодарность кафедре «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета и, в частности, профессору Щицыну Юрию Дмитриевичу за оказанную помощь в плазменной обработке.

1. *Коробов Ю. С., Шумяков В. И., Филиппов М. А. и др.* Структура и износостойкость напыленных покрытий системы Fe-Cr-C-Ti с метастабильным аустенитом // Инновации в материаловедении и металлургии : материалы III Междунар. интерактив. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2013. С. 100–104.

2. *Ример Г. А., Верхорунов В. С., Невежин С. В., Коробов Ю. С., Филиппов М. А.* Экономнолегированная порошковая проволока для по-

вышения ресурса эксплуатации плунжеров гидропрессов методом дуговой металлизации // Сварка и диагностика : сб. докл. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2014. С. 105–111.

3. *Lima C. R. C., Bette B. V., Camargo F., Fals H. C., Ferraresi V. A.* Wear Performance of Thermally Sprayed and Welded Coatings Using Conventional and Nanostructured Materials. Proc. of ITSC 2013, ASM International: Busan, Korea, 2013. P. 424–428

4. *Утенков В. М., Зайцев А. Н.* Исследование триботехнических характеристик перспективных износостойких плазменных покрытий при трении скольжения без смазки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2013. № 11. С.81–89.

5. *Клеменов В. А., Панин В. Е., Безбородов В. П. и др.* Исследование структуры и свойств никелевых порошковых покрытий после оплавления // Физика и химия обработки материалов. 1997. № 6. С. 68–75.

6. *Спиридонов Н. В., Кардаполова М. А., Девойно О. Г.* Влияние лазерного нагрева на износостойкость композиционных покрытий // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 1. С. 60–65.

7. *Pokhmurs'ka H., Chervins'ka N., Student M., Zadorozhna Kh.* Effect of the laser fusion of electrometallized coatings of the Fe-Cr-B-Al system on their corrosion resistance // Materials Science. 2006. Vol. 42, Nr 6. P. 837–842.

8. *Pokhmurs'ka H. V., Dovhunya V. M., Student M. M.* Wear resistance of laser-modified arc-sprayed coatings made of FMI-2 powder wires // Materials Science. 2003. Vol. 39, Nr 4. P. 533–538.

9. *Pukasiewicz A. G. M., Alcover Jr. P. R. C., Capra A. R., Paredes R. S. C.* Influence of Plasma Remelting on the Microstructure and Cavitation Resistance of Arc-Sprayed Fe-Mn-Cr-Si Alloy // J. of Thermal Spray Technology, 2014. Vol. 23 (1–2). P. 51–59.

10. *Щицын Ю. Д.* Плазменные технологии в сварочном производстве. Ч. 1 / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2004. 73 с.

11. *Коробов Ю. С.* Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий // Сварочное производство. 2005. № 2. С. 47–49.

12. *Белинин Д. С., Верхорузов В. С., Кучев П. С., Струков Н. Н., Щицын Ю. Д.* Плазменная закалка тяжело нагруженных деталей из стали 40X13 // Вестн. Перм. гос. техн. ун-та, 2011. Т. 13, № 3. С. 12–18.

13. *Гуляев А. П., Гуляев А. А.* Металловедение : учебник для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. М., 2011. 643 с.

ЛЕГКОПЛАВКИЕ ЭМАЛИ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ЭМАЛИРОВАНИЯ СТАЛИ

И. Г. Ворошилова, О. Р. Лазуткина, Е. П. Фарафонтова,
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Применение диатомита в качестве части силикатного компонента эмалевой шихты снижает температуру плавления силикатных эмалей, увеличивает энергоэффективность производства и снижает производственные затраты. Введение диатомита ускоряет процессы формирования силикатов и позволяет получить более однородную фритту. Исследованы природные минералы, отобранные из карьеров ирбитского и камышловского заводов строительных материалов, расположенных на Урале. Исследованы структура, минералогические особенности, химический состав и фазовые превращения в процессе термообработки пород от комнатной температуры до их плавления.

The use of diatomite as part of the silicate component of the enamel charge reduces the melting temperature of silicate enamels, increase production energy efficiency and reduce production costs. The introduction of silicate diatomite accelerates the silicate formation processes and enables a more homogeneous frit. Natural rocks selected from quarries of Irbit and Kamyshlov construction materials plants, situated in the Ural are researched. The structure, mineralogical characteristics of chemical composition and heat treatment process of phase transformations in rocks from room temperature to the melting point are investigated.

В Свердловской области имеются значительные запасы кремнезем-содержащего сырья в виде диатомитов, трепела и опоки, залегающего на небольших глубинах [1–2]. Нами исследованы природные породы, отобранные из карьеров ирбитского и камышловского заводов строительных материалов. Изучена структура, минералогические особенности, химический состав, фазовые превращения в процессе термообработки пород от комнатной температуры до их плавления.

Ирбитский диатомит представляет собой желтовато-серую, а камышловский – зеленовато-серую осадочные породы, основной частью которых является аморфный SiO_2 , содержание которого по массе 70–80 %. При исследовании физико-механических свойств пород получены следующие данные: объемный вес их в куске находится в пределах 500–700 кг/м³; пористость колеблется в пределах 80–90 %; естественная влажность составляет 7–10 %; тонина помола (остаток на сите

008) получен 9–10 %; удельная поверхность $S_{уд} = 3800 \text{ см}^2/\text{г}$, что соответствует тонкодисперсной легкой пористой структуре. Изучение гранулометрического состава диатомитов показало, что на долю пылевидной фракции (размер частиц 0,06–0,005 мм) приходится до 75 % частиц, содержание песчаной фракции (размер частиц 1–0,06 мм) составляет около 20 % и глинистой фракции (размер частиц менее 0,005 мм) – около 5 %. Эти данные позволяют отнести исследованные диатомиты к группе палеватых супесей по классификации Охотина. Для определения минералогического состава породы ирбитского диатомита был проведен его рентгенофазовый анализ, который показал, что в области малых и средних углов имеется «гало», что свидетельствует о высокой степени аморфизации основных составляющих породы. Этот вывод подтверждает и характер дифракционных отражений – они имеют размытый, «стертый» максимум, а в некоторых случаях полуширина отражения соразмерна с его высотой. При расшифровке рентгенограммы установлено, что основной кристаллической фазой является β -кварц, для кристаллической решетки которого характерны дифракционные отражения ($d = 0,443; 0,334; 0,181 \text{ нм}$).

Усредненный состав исследованных пород по результатам химического анализа представлен в табл. 1.

Таблица 1

Усредненный состав исследованных пород

Содержание оксида, % по массе	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O+Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ВТ+п.п.п.
Ирбитский диатомит	72,00	0,95	1,36	8,20	2,10	3,92	0,40	13,07
Камышловский диатомит	75,40	1,90	0,80	9,00	2,20	4,10	-	6,60

Результаты анализа химического, гранулометрического и минерального составов исследованных пород свидетельствуют о перспективности использования их в качестве алюмосиликатного сырья для получения стекловидных эмалевых фритт [3]. Наличие в составах диатомитовых пород высокого содержания оксидов железа предопределяет их интенсивное окрашивание [2], что позволит использовать их главным образом для технического эмалирования, где применяются темноокрашенные грунтовые эмали.

Аморфные формы кремнезема, присутствующие в диатомите, в том числе и его гидраты, хорошо растворяются в щелочах и значительно

более химически активны, чем кварц. Высокая активность диатомита обусловлена адсорбцией гидратных образований карбонатов щелочных и щелочноземельных металлов на развитой аморфизированной поверхности минеральных фаз диатомита, что позволит интенсифицировать процессы спекания и плавления шихтовой массы эмалевой фритты. Таким образом, диатомитовые породы могут служить источником силикатсодержащего сырья для эмальпроизводства. Наличие в составе диатомитовых пород оксидов железа обуславливает возможность создания на их основе стекловидных эмалевых покрытий, имеющих хорошие показатели прочности сцепления с металлом и широкую цветовую гамму без дополнительного введения красителей и оксидов сцепления.

С целью определения оптимального состава эмалей и исследования влияния содержания диатомита в шихте на варочные свойства эмалей были сняты дериватограммы шихт различных составов (табл. 2) с диатомитом и кварцем.

Таблица 2

Состав шихты, % по массе

№ состава	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	72,0	66,80	63,58	60,40	57,05	53,82	50,58	47,3	39,46
CaO	0,95	2,170	2,77	3,37	3,98	4,59	5,20	5,82	6,84
MgO	1,36	1,110	0,97	0,83	0,70	0,56	0,42	0,28	-
Al ₂ O ₃	8,20	8,110	7,99	7,85	7,75	7,63	7,51	7,39	6,94
K ₂ O	1,27	1,300	1,18	1,32	1,33	1,34	1,34	1,35	1,33
Na ₂ O	0,31	4,100	6,00	7,89	9,82	11,74	13,65	15,59	18,87
B ₂ O ₃	-	4,220	6,34	8,44	10,6	12,74	14,90	17,02	20,70
Co ₂ O ₃	-	0,100	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,49
NiO	-	0,240	0,36	0,48	0,60	0,72	0,84	0,96	1,17
MnO	-	0,024	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,97
Fe ₂ O ₃	3,92	3,220	2,84	2,45	2,00	1,68	1,29	0,90	0,12
TiO ₂	0,40	0,326	0,29	0,245	0,20	0,16	0,123	0,08	-
F св. 100 %	-	0,536	0,80	1,07	1,34	1,61	1,88	2,14	2,68

Для шихт данных составов, в которых оксид кремния вводили в одном случае кварцевым песком, а в другом диатомитом ирбитского месторождения, были сняты дериватограммы и определены температуры размягчения и начала стеклования. Зависимости этих температур от содержания оксида кремния для кварцевой и диатомитовой шихт приведены на рис. 1.

Как видно из рис. 2, разность температур размягчения и начала стеклования для шихт с кварцевым силикатным сырьем и с диатомитовым

составляет примерно 100 °С и мало зависит от содержания оксида кремния.

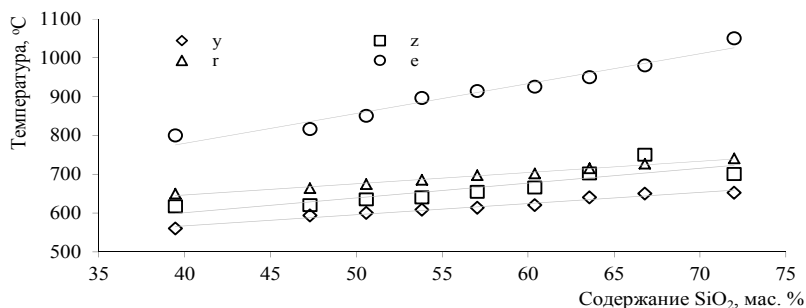


Рис. 1. Зависимость температур начала размягчения и стеклования от содержания оксида кремния:
 у, z – температуры начала размягчения с диатомитом и кварцем;
 r, e – температуры начала стеклования с диатомитом и кварцем

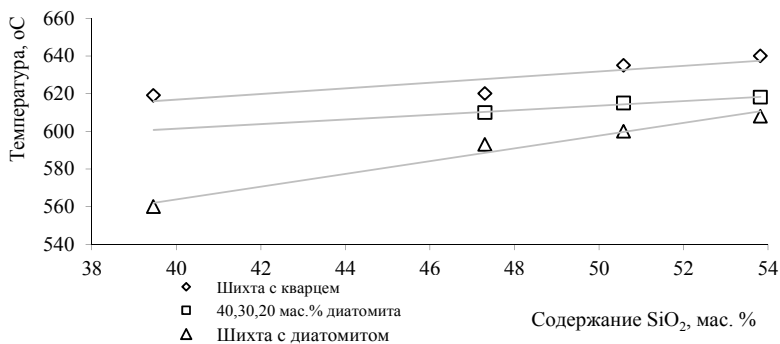


Рис. 2. Зависимость температуры размягчения от содержания оксида кремния

Основной проблемой, тормозящей использование диатомитового сырья, является бурное газообразование в процессе плавки шихты. Исходя из этого, важно выяснить, какое количество диатомита целесообразно

вводить в состав эмалевой шихты для ускорения ее варки, не вызывая бурного кипения. Как видно из рис. 3, при введении в состав шихты от 20 до 40 мас. % диатомита наблюдается максимальное снижение температур размягчения и начала стеклования, дальнейшее увеличение доли диатомита до 100 % незначительно увеличивает плавкость шихты. В процессе варки особенно бурное кипение и увеличение объема расплава наблюдалось при введении от 60 до 100 мас. % диатомита, при уменьшении доли диатомита до 40 мас. % кипение значительно снижается.

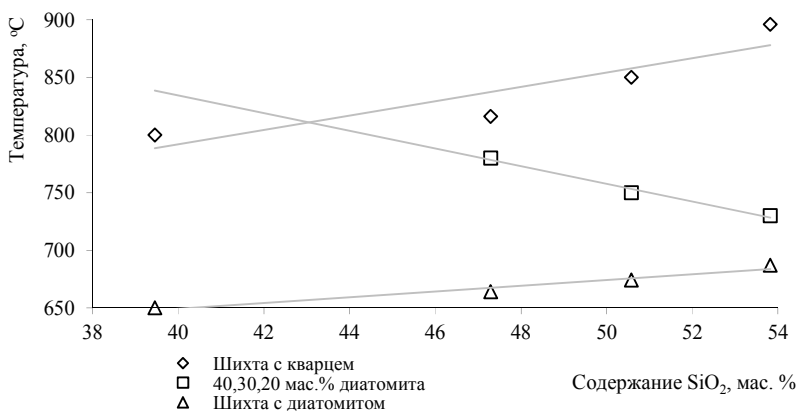


Рис. 3. Зависимость температуры начала стеклования от содержания оксида кремния

Исходя из этого, можно сделать вывод, что оптимальным следует считать содержание диатомита в эмалевой шихте 35–25 мас. %, что подтверждают экспериментальные данные.

1. Иванов С. Э., Беляков А. В. Диатомит и области его применения // Стекло и керамика. 2008. № 2. С. 18–21.
2. Нажарова Л. Н., Гнусина Т. С., Губайдуллина А. М., Филиппович Е. Н. Ирбитские диатомиты как потенциальное сырье для синтеза растворимых силикатов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16, № 21. С. 49–51.
3. Лазуткина О. Р., Казак А. К., Темерева А. А., Недополз С. О. Стеклоэмали на основе диатомитового сырья для стали // Стекло и керамика. 2006. № 5. С. 36–37.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ НА НЕПРЕРЫВНОМ УНИВЕРСАЛЬНОМ РЕЛЬСОБАЛОЧНОМ СТАНЕ

А. В. Головатенко¹, А. А. Уманский², В. Н. Кадыков²

¹ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат, Новокузнецк

²Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк

В условиях непрерывного универсального рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены экспериментальные исследования технологичности и энергоэффективности различных режимов прокатки при производстве длинномерных железнодорожных рельсов. На основании проведенных исследований разработан новый интенсифицированный режим обжатий при прокатке в обжимных реверсивных клетях, использование которого позволило снизить удельный расход электроэнергии и повысить качество поверхности готовых рельсов.

Under continuous universal rolling mill of EVRAZ ZSMK experimental studies technology and energy efficiency of different modes of rolling in the production of long rails. On the basis of the research, a new regime intensified rolling reduction in crimp reversing stand, the use of which has reduced the specific energy consumption and improve the quality of finished rails.

На этапе ввода в эксплуатацию новых прокатных станов одной из основных задач является разработка энергоэффективных режимов прокатки, обеспечивающих высокую производительность и качество готовой продукции в соответствии с установленными нормативными требованиями. Наиболее эффективным способом одновременного достижения указанных показателей является интенсификация режимов обжатий, так как при этом снижаются удельные энергозатраты, повышается качество внутренней структуры проката [1, 2], выкатываются имеющиеся на исходных заготовках поверхностные дефекты [3–5].

В ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 2013 г. запущен в эксплуатацию первый в России непрерывный универсальный рельсобалочный стан для производства длинномерных (длиной до 100 м) железнодорожных рельсов. Указанный рельсобалочный стан имеет в своем составе следующее основное оборудование: нагревательную печь с шагающими балками; устройства для гидросбива окалины; обжимные реверсивные клетки (BD1 и BD2) с последовательным расположением; универсальный тандем-стан, включающий в себя две универсальные и одну горизон-

тальную вспомогательную клеть; чистовую калибрующую универсальную клеть; устройства для автоматического измерения чистового профиля; клеймочную машину.

В соответствии с контрактной калибровкой железнодорожных рельсов Р65 схема прокатки в обжимных клетях стана включает в себя 7 проходов в клетю BD1 и 5 проходов в клетю BD2.

С целью оптимизации режимов прокатки проведена серия опытно-промышленных экспериментов, в ходе которых длинномерные железнодорожные рельсы Р65 прокатывали по трем режимам:

- 7 пропусков в клетю BD1 и 5 пропусков в клетю BD2 (режим № 1 – в соответствии с контрактной калибровкой);
- 9 пропусков в клетю BD1 и 3 пропуска в клетю BD2 (режим № 2);
- 7 пропусков в клетю BD1 и 3 пропуска в клетю BD2 (режим № 3).

Абсолютные обжатия (Δh) и степень деформации (ε) при использовании указанных режимов прокатки представлены в табл. 1, расчетные значения усилия прокатки по проходам – на рис. 1.

Таблица 1

Режимы обжатий при прокатке рельсов Р65

Клеть	№ про- хода	Параметры деформации					
		Режим № 1		Режим № 2		Режим № 3	
		Δh	ε	Δh	ε	Δh	ε
BD1	1	60	16,4	43	14,3	60	
	2	48	15,7	51	13,8	48	
	3	60	18,8	62	19,4	60	
	4	45	17,3	38	13,8	31	
	5	20	7,2	20	8,4	60	
	6	25	9,7	45	17,0	29	
	7	15	6,7	10	4,5	53,5	
	8	-	-	23,5	9,6	-	-
	9	-	-	27	12,1	-	-
BD2	1	45,5	18,5	100	40,0	90	
	2	6	3,0	15	21,4	25	
	3	90	36,0	11	20,0	12	
	4	25	31,3	-	-	-	
	5	12	21,8	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-

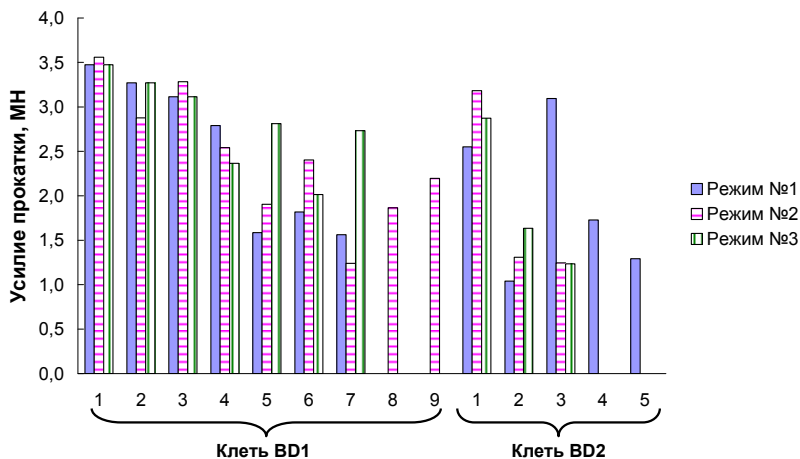


Рис.1. Усилия прокатки по проходам

При прокатке по всем вышеуказанным режимам проводили осциллографирование работы двигателей обжимных клетей.

Следует отметить, что обе клетки оборудованы аналогичными синхронными двигателями типа AMZ 0900LT08 LSB, технические характеристики которых представлены в табл. 2.

Таблица 2
Технические характеристики двигателей клетей BD1 и BD2

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Номинальная скорость вращения	310 об/мин
2	Максимальная скорость вращения	982 об/мин
3	Номинальная сила тока	744 А
4	Номинальное напряжение статора	3165 В
5	Номинальная мощность	4000 кВт
6	Номинальный момент на валу двигателя - при номинальной скорости вращения - при максимальной скорости вращения	123 кН·м 39 кН·м

При этом для двигателей клетей BD1 и BD2 существуют следующие ограничения по перегрузке от номинала в процессе работы:

- не более 115 % от номинала при непрерывной перегрузке;
- не более 225 % от номинала при перегрузке в течение 30 с;

– не более 250 % от номинала при перегрузке в течение 2 с.

Результаты обработки полученных осциллограмм (табл. 3–5), свидетельствуют, что при использовании всех опробованных схем прокатки режимы работы двигателей клеток BD1 и BD2 не выходят за пределы допустимых.

Таблица 3

Статические моменты на валу двигателя клетки BD1

№ про- пуска	Статические моменты на валу двигателя ($M_{СТ}$) и скорости вращения (n) вала двигателя					
	Режим № 1		Режим № 2		Режим № 3	
	$M_{СТ}$, % от ном.	n , об/мин	$M_{СТ}$, % от ном.	n , об/мин	$M_{СТ}$, % от ном.	n , об/мин
1	100	370	135	315	110	210
2	82	370	110	368	100	370
3	105	475	135	485	110	415
4	77	463	95	465	80	476
5	35	504	40	485	80	476
6	730	463	40	465	55	420
7	55	525	70	420	76	580
8	-		55	355	-	-
9	-		-35	537	-	-

Таблица 4

Динамические моменты на валу двигателя клетки BD1

№ про- пуска	Средние динамические моменты на валу двигателя ($M_{дин}$) за период времени (t)					
	Режим № 1		Режим № 2		Режим № 3	
	$M_{дин}$, % от ном.	t , с	$M_{дин}$, % от ном.	t , с	$M_{дин}$, % от ном.	t , с
1	144	1,0	180	0,7	170	0,3
2	123	1,0	155	1,0	155	0,7
3	145	1,3	175	1,3	160	0,9
4	120	0,9	135	0,9	130	1,2
5	80	1,0	90	1,0	125	0,7
6	75	0,9	85	0,9	102	0,4
7	95	1,4	115	1,0	120	1,2
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	85	1,2	-	-

Таблица 5

Статические моменты на валу двигателя клетки BD2

№ про- пуска	Статические моменты на валу двигателя ($M_{СТ}$) и скорости вращения (n)					
	режим № 1		режим № 2		режим № 3	
	$M_{СТ}$, % от ном.	n , об/мин	$M_{СТ}$, % от ном.	n , об/мин	$M_{СТ}$, % от ном.	n , об/мин
1	66	495	85	366	105	355
2	20	455	70	344	68	315
3	92	377	35	484	38	485
4	70	344	-	-	-	-
5	33	385	-	-	-	-

Сравнительный анализ энергоэффективности рассматриваемых схем прокатки, проведенный с использованием программного обеспечения Drive Window, показал, что при использовании режима прокатки № 3 наблюдается снижение удельного расхода электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т и 0,86 кВт·ч/т относительно режимов прокатки № 1 и № 2 соответственно (рис. 2).

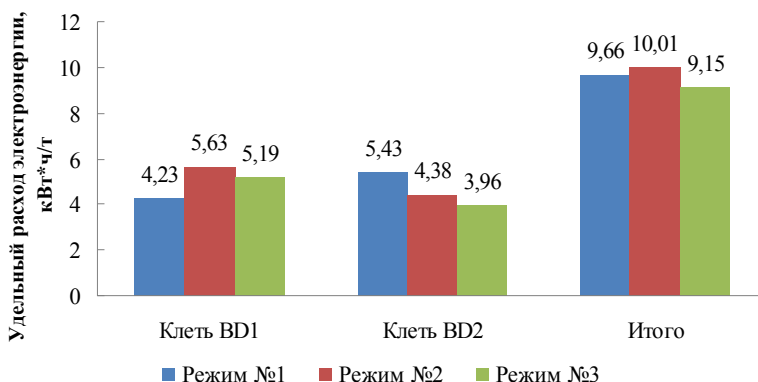


Рис. 2. Удельный расход электроэнергии при использовании различных режимов прокатки длинномерных рельсов Р65

На основании результатов опытно-промышленного опробования режим прокатки № 3 внедрен в производство, что позволило получить фактический экономический эффект 2 млн руб./год за счет снижения

расхода электроэнергии и уменьшения отбраковки рельсов по дефектам поверхности на 0,1 %.

-
1. *Колмогоров В. Л.* Механика обработки металлов давлением. М., 1986. 688 с.
 2. *Грудев А. П., Машкин Л. Ф., Ханин М. И.* Технология прокатного производства. М., 1994. 656 с.
 3. *Зильберг Ю. В.* [и др.] Исследование закономерностей формоизменения поверхностных дефектов при прокатке // *Сталь*. 1997. № 10. С. 44–46.
 4. *Егоров В. Д.* [и др.] Выкатываемость дефектов при прокатке крупносортовой стали // *Сталь*. 1995. № 1. С. 32–34.
 5. *Уманский А. А., Мартьянов Ю. А.* Моделирование процессов выработки поверхностных дефектов заготовки при различных условиях прокатки // *Вестн. горно-металлург. секции РАЕН. Отделение металлургии* : сб. науч. тр. Москва ; Новокузнецк, 2012. Вып. 30. С. 51–58.

РАСЧЕТ ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ ТЮБИНГА

А. И. Голоднов¹, Г. Л. Березин², А. И. Голоднова¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург;

²Открытое акционерное общество «Металлист»,
Свердловская область, Качканар

В данной статье представлен расчет запаса прочности тубинга из высокопрочного чугуна. Изучено влияние конструкции тубинга на его запас прочности. На основе проведенного исследования автором предлагается принять в эксплуатацию новую конструкцию тубинга.

This article presents the calculation of factor of safety tubing of ductile iron. During the work it was studied the influence of the construction of the tubing at its factor of safety. On the basis of the conducted research the author proposes to take-up new construction tubing.

Введение

В настоящее время ОАО «Металлист» производит различные типы тубингов, предназначенных для строительства шахт. Для одной шахты заказчик требует 10 разновидностей тубинга из высокопрочного чугуна ВЧ60 с толщиной стенки 90 мм. Разница между отдельными типами тубингов заключается в расположении отверстий на ребре жесткости.

Поскольку все отверстия получаются литьем, для каждого типа тубингов требуется изготовление отдельной оснастки. В целях экономии выгодно изготавливать не десять отдельных типов тубинга, а один – универсальный. В этом случае на ребре жесткости необходимо предусмотреть 11 отверстий вместо стандартных 2–3 (рис. 1). Для принятия подобного решения требуется произвести расчет запаса прочности тубинга с дополнительными отверстиями и без них.

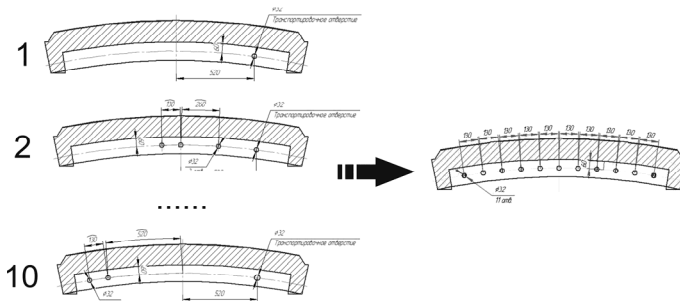


Рис. 1. Схема расположения отверстий на ребре жесткости тубинга

Для расчетов запаса прочности использовали SolidWorks Simulation – широко известный CAE-модуль. CAE (англ. Computer-aided engineering) – общее название для программ, предназначенных для инженерных расчетов конструкций и анализа процессов, связанных с ними [1].

Расчеты, выполняемые в SolidWorks Simulation основаны на методе конечных элементов [1]. Метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Суть МКЭ заключается в том, что исследуемая область разбивается на конечные элементы, в каждом из которых произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции и затем находятся значения этих функций на границах элементов. Процесс деления модели на малые части – создание сетки.

Для определения запаса прочности тьюбинга в SolidWorks Simulation выполняли статический анализ. Применение данной методики расчета возможно при следующих условиях [1]:

Допущение линейности

Возникающая реакция прямо пропорциональна приложенным нагрузкам. Например, если вдвое увеличить величину нагрузок, реакция модели (перемещения, нагрузки и напряжения) также увеличится вдвое. Допущение линейности можно использовать, если выполняются следующие условия:

- Вычисленное наивысшее давление имеет место на линейном участке диаграммы напряжений-деформаций, которая начинается прямой линией, исходящей из начала координат.
- Максимальное расчетное перемещение значительно меньше характеристического размера детали. Например, максимальное смещение плиты должно быть значительно меньше ее толщины, а максимальное смещение балки значительно меньше ее поперечного сечения.

Допущение упругости

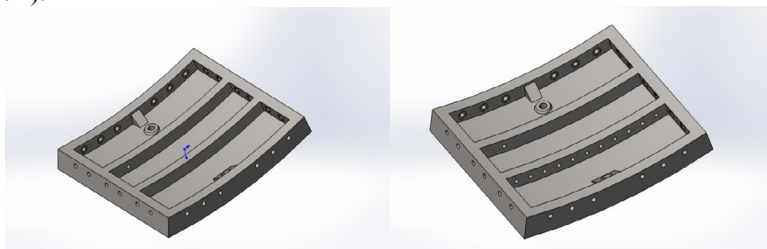
При снятии нагрузок деталь восстанавливает свою исходную форму (необратимая деформация отсутствует).

Допущение статичности

Нагрузки прилагаются медленно и постепенно, пока не достигнут своих полных значений. Резкое приложение нагрузок вызывает дополнительные перемещения, нагрузки и напряжения.

Если одно из принятых допущений линейности не выполняется, для получения объективных данных необходимо использовать нелинейный анализ.

Для сравнения производили расчет запаса прочности тьюбинга без отверстий на ребре жесткости и тьюбинга с одиннадцатью отверстиями (рис. 2).



a *б*
Рис. 2. Тьюбинг с толщиной стенки 90 мм:
a – без отверстий; *б* – с дополнительными отверстиями

Для проведения расчетов была сгенерирована тетрагональная сетка для тьюбинга без отверстий и для тьюбинга с дополнительными отверстиями.

Для того чтобы произвести расчет в SolidWorks Simulation, нужно определить свойства материала, из которого изготовлен тьюбинг и задать граничные условия.

Свойства материала

В соответствии с технической документацией тьюбинг изготавливается из высокопрочного чугуна ВЧ60. Согласно данным заказчика диапазон рабочих температур для данного тьюбинга составляет от 0 до +20 °С. Поэтому для проведения расчетов принимали следующие механические свойства материала [2]:

- модуль упругости – 180000 МПа;
- коэффициент Пуассона – 0,22;
- предел прочности при растяжении – 600 МПа;
- предел прочности при сжатии – 600 МПа;
- предел текучести – 370 МПа;
- плотность – 7200 кг/м³.

Граничные условия:

Для выполнения расчета в SolidWorks Simulation нужно задать условия фиксации изделия и определить нагрузки, действующие на изделие:

1. *Условия фиксации изделия.* Принимали, что тьюбинг надежно зафиксирован на крепежных отверстиях (6 отверстий на каждой поверхности).

2. *Внешние нагрузки.* По условиям напряженного состояния тьюбинга, предоставленным заказчиком, тьюбинг должен выдерживать нормальную силу в 3817334 Н. По условиям расчета сила была направлена по нормали к наружной поверхности тьюбинга.

Для определения запаса прочности SolidWorks Simulation использует критерий максимального расчетного напряжения [1]. Этот критерий точно определяет, что материал начинает деформироваться, когда максимальное эквивалентное напряжение достигает предела текучести материала. Предел текучести определяется как свойство материала. Для расчета эквивалентных напряжений в SolidWorks Simulation заложено несколько методик (напряжения Фон Мизеса, напряжения Мора – Кулона, максимальное нормальное напряжение и т. д.).

Поскольку чугун является материалом с хрупким характером разрушения, для определения запаса прочности тьюбинга использовали критерий Мора – Кулона [1].

Критерий напряжения Мора – Кулона основан на теории, известной также как теория внутреннего трения. Теория предсказывает возникновение отказов, если для сочетания максимума и минимума главного напряжения превышены соответствующие пределы напряжений [1].

Для расчетных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 , которые упорядочены как $|\sigma_1| > |\sigma_2| > |\sigma_3|$, теория Мора – Кулона предсказывает отказы в соответствии с табл. 1 [1].

Таблица 1

**Предсказывание отказов в соответствии
с теорией Мора – Кулона [1]**

Состояние главных напряжений	Критерий разрушения	FOS
Оба главных напряжения при натяжении: $\sigma_1 > 0$ и $\sigma_3 > 0$	$\sigma_1 > \sigma_{\text{пред. растяжения}}$	$(\sigma_1 / \sigma_{\text{пред. растяжения}})^{-1}$
Оба главных напряжения при сжатии: $\sigma_1 > 0$ и $\sigma_3 > 0$	$ \sigma_1 > \sigma_{\text{пред. сжатия}}$	$(\sigma_1 / \sigma_{\text{пред. сжатия}})^{-1}$
$\sigma_1 > 0$ при натяжении, $\sigma_3 < 0$ при сжатии	$\sigma_1 / \sigma_{\text{пред. растяжения}} + \sigma_3 / \sigma_{\text{пред. сжатия}} > 1$	$(\sigma_1 / \sigma_{\text{пред. растяжения}} + \sigma_3 / \sigma_{\text{пред. сжатия}})^{-1}$
$\sigma_1 < 0$ при сжатии, $\sigma_3 > 0$ при натяжении	$ \sigma_1 / \sigma_{\text{пред. сжатия}} + \sigma_3 / \sigma_{\text{пред. растяжения}} > 1$	$(\sigma_1 / \sigma_{\text{пред. сжатия}} + \sigma_3 / \sigma_{\text{пред. растяжения}})^{-1}$

В качестве $\sigma_{\text{пред. растяжения}}$ и $\sigma_{\text{пред. сжатия}}$ при расчетах использовали предел текучести чугуна.

По результатам расчета в SolidWorks Simulation были построены эпюры запаса прочности (рис. 3).

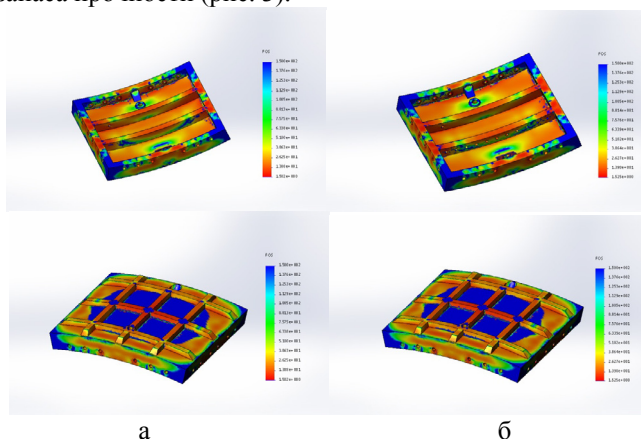


Рис. 3. Эпюра запаса прочности тьюбинга:
а – без отверстий; б – с дополнительными отверстиями

Интерпретировать значение запаса прочности можно следующим образом [1]:

- Запас прочности менее 1,0 в каком-либо местоположении указывает на то, что материал в этом местоположении перешел в состояние текучести, и конструкция стала ненадежной.
- Запас прочности, равный 1,0, в каком-либо местоположении указывает на то, что материал в этом местоположении начал переходить в состояние текучести.
- Запас прочности более 1,0 в каком-либо местоположении указывает на то, что материал в этом местоположении еще неподатлив.

Материал в каком-то местоположении начнет становиться текучим, если применить новые нагрузки, равные текущим нагрузкам, умноженным на полученный коэффициент запаса прочности.

Расчеты показывают, что тьюбинг без отверстий и тьюбинг с дополнительными отверстиями имеют одинаковый минимальный запас прочности равный 1,5 (рис. 4.).

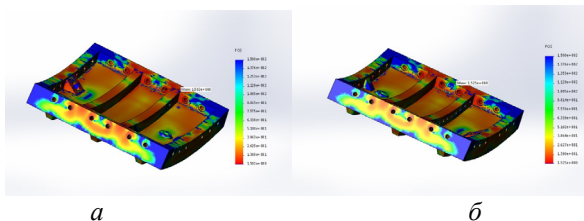


Рис. 4. Минимальный запас прочности тубинга:
а – без отверстий; *б* – с дополнительными отверстиями

При этом минимальный запас прочности изделия в обоих случаях соответствует крепежным отверстиям. Следовательно, именно в этих частях тубинга развиваются максимальные напряжения. На рис. 5 представлено распределение запаса прочности по сечению ребра жесткости с отверстиями и без них.

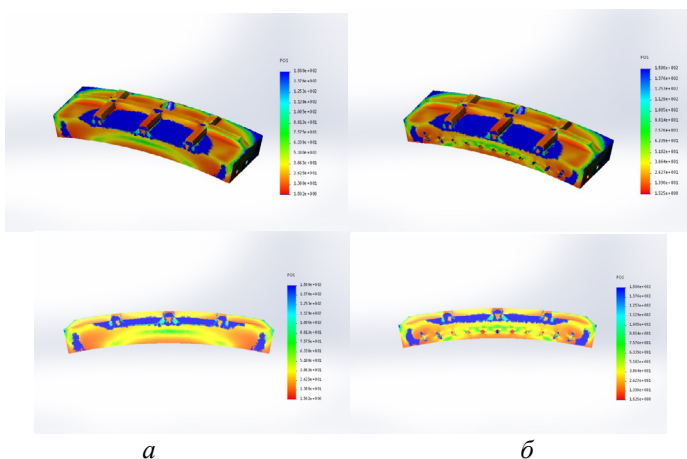


Рис. 5. Эпюра изменения запаса прочности
 по сечению измененного ребра жесткости:
а – без отверстий; *б* – с дополнительными отверстиями

По эпюрам видно, что появление дополнительных отверстий приводит к незначительным изменениям запаса прочности ребра жесткости. Таким образом, можно заключить, что ребро жесткости имеет существенный запас прочности как с дополнительными отверстиями, так и без них. Использование универсального тубинга является вполне допустимым.

-
1. *Алямовский А. А.* Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М., 2010. 464 с.
 2. *Белов В. Д., Вдовин К. Н., Колокольцев В. Н., Ковалевич У. В., Тэн Э. Б., Ри Хосен, Ри Э. Х.* Производство чугунных отливок : учебник / под. ред. В. М. Колокольцева и Ри Хосена. Магнитогорск, 2009. 521 с.

ТЕКСТУРА ГОРЯЧЕКАТАНОГО СПЛАВА Fe-3%Si

С. В. Данилов, А. А. Редикульцев, М. Л. Лобанов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Текстура горячекатаного технического сплава Fe-3%Si в поверхностном и в центральном слоях полосы состоит из наборов стабильных ориентировок. Поверхностный слой представлен в основном ориентировками рекристаллизации, текстура центрального слоя сформирована набором деформационных ориентировок. Ориентировки поверхности полосы являются развернутыми на 90° вокруг ПН относительно ориентировок центрального слоя. Компоненты текстуры рекристаллизации воспроизводят компоненты текстуры деформации. При реализации поперечного течения материала в процессе горячей прокатки на кромках полосы в поверхностных слоях формируется устойчивая ориентировка деформации $\{112\}<110>$. Процессы рекристаллизации на краях полосы практически не реализуются.

Texture hot rolling alloy Fe-3%Si in the surface layers and in the central band consists of a set of stable orientations. The surface layer consists mainly of recrystallization orientations, the texture of the central layer is formed a set of deformation orientations. The surface orientations of the strip are rotated by 90° around the TD relative orientations of the central layer. Recrystallization texture components reproduce deformation texture components. Recrystallization replaces texture in local areas. With transverse flow (near the edges) in hot rolling, the stable orientation $\{112\}<110>$ is formed in the surface layers. Recrystallization process at the edges of the strip does not take place.

Введение

До настоящего времени электротехническая анизотропная сталь (ЭАС, технический сплав Fe-3%Si, трансформаторная сталь, GO, CGO, RGO, Hi-B) остается важнейшим магнито-мягким материалом, используемым для изготовления магнитопроводов разнообразных электротехнических устройств, что связано с высокими значениями магнитной проницаемости и магнитной индукции, а также минимальными потерями при перемагничивании данного материала [1–6].

Магнитные свойства ЭАС определяются наличием в ней текстуры (110)[001] (текстура Госса), которая образуется на последних стадиях ее обработки при высокотемпературном отжиге в результате вторичной рекристаллизации. Причем аномально растущие зерна с госсовской текстурой растут из поверхностного слоя – 1/6-1/8 толщины полосы ЭАС [7]. Сталь от горячей прокатки до окончательной обработки проходит

сложный технологический путь, включающий один или несколько циклов «прокатка – отжиг» (деформация – рекристаллизация), в процессе которых существенно изменяются ее структура и текстура [5]. Предпосылки для образования текстуры (110)[001] при вторичной рекристаллизации закладываются на стадии горячей прокатки – в поверхностных слоях полосы формируются зерна с текстурой, близкой к госсовской [7–10]. Естественно полагать, что чем острее текстура Госса после горячей прокатки, тем совершеннее текстура в готовой ЭАС.

При деформации формирование текстуры происходит в стесненных условиях вследствие скольжения дислокаций по системам, имеющим максимальный фактор Шмида [11]. Реальная схема деформации при прокатке является достаточно сложной [11–13]. Однако при холодной прокатке упрощенно ее можно свести к растяжению вдоль направления прокатки и сжатию по нормали к плоскости листа [14]. При таком упрощении максимальные касательные напряжения должны возникать в плоскостях, лежащих под углом 45° к направлению прокатки и пересекающихся по направлению, параллельному оси валков. Реализация скольжения по системам, имеющим максимальный фактор Шмида, приводит к формированию в сплаве Fe-3%Si устойчивых ориентировок: $\{001\}\langle 110\rangle$, $\{111\}\langle 110\rangle$, $\{112\}\langle 110\rangle$ или условно устойчивых ориентировок типа $\{111\}\langle 112\rangle$ [15].

При горячей прокатке существенно возрастает трение между полосой и валками, что изменяет напряженное состояние и, как следствие, приводит к формированию в поверхности сплава Fe-3%Si стабильной ребровой ориентировки (110)[001], неустойчивой при холодной прокатке [7, 8]. Однако в определенных ситуациях напряженное состояние принципиально не может рассматриваться как двумерное, например: деформация кромки полосы в процессе прокатки.

Целью настоящей работы являлось исследование формирования текстуры сплава Fe-3%Si при горячей прокатке по ширине и толщине полосы и ее взаимосвязь с особенностями напряженного состояния.

Материал и методика исследования

Для исследования от середины (по длине) горячекатаной полосы толщиной 2,5 мм, полученной с непрерывного широкополосного стана, промышленного сплава Fe-3%Si с однофазной ферритной структурой (ЭАС нитридного-медного варианта ингибирования [5, 6]) отбирался лист (ширина ~ 1060 мм).

Из отобранного листа, начиная от самой кромки, перпендикулярно направлению прокатки с шагом 30 мм вырезались образцы для проведения исследований. Металлографические шлифы приготавливались с направления поперечного направления прокатки и нормали к плос-

кости листа. Металлографический анализ проводился на аппарате *Neophot 2M*. По данным оптической металлографии отбирались образцы для проведения ориентационной микроскопии. Исследования микро-структуры и текстуры проводились на электронном микроскопе *JEOL JSM6490LV* с приставкой *Oxford Instruments (EBSD)*.

В качестве лабораторной принята система координат, оси которой связаны с направлением холодной прокатки (НП), нормалью к ее плоскости (НН) и перпендикулярным им направлением (ПН), которое совпадает с осью валков, так что все три направления образуют правую тройку векторов.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования ориентировок зерен горячекатаной полосы показали, что текстура материала сильно зависит от положения образца по толщине (рис. 1) и по ширине полосы (рис. 2).

Поверхностный слой основного объема полосы (рис. 1, б–г, о–р) характеризуется наличием текстуры, состоящей из рассеянных ориентировок: основной $\sim (110)[001]$ и слабых $\sim \{110\}\langle 112 \rangle \dots \langle 113 \rangle$. Текстура центрального слоя горячекатаной полосы (рис. 1, е–з, к–м) в основном характеризуется преимущественной ориентировкой $\sim (100)[011]$ и ориентировками, близкими к $\{112\}\langle 110 \rangle$. Эти ориентировки являются стабильными при деформации материала растяжением в НП.

Анализ ориентационных карт (рис. 1, д, и) и соответствующих прямых полюсных фигур (ППФ – рис. 1, е–з, к–м) центрального слоя образцов, вырезанных с центральной части (по ширине) полосы, показывает, что деформированные зерна имеют ориентировки, близкие к $(001)[110]$, двум из $\{112\}\langle 110 \rangle$, двум из $\{111\}\langle 112 \rangle$ и $\{111\}\langle 110 \rangle$. Рекристаллизованные зерна имеют тот же набор ориентировок.

Большая деформация, вызванная определенным напряженным состоянием, приводит к появлению в структуре набора стабильных ориентировок [16]. При одноосном растяжении для ОЦК-решетки такими ориентировками являются $(001)[110]$, две ориентировки $\{112\}\langle 110 \rangle$, две $\{111\}\langle 110 \rangle$ и две $\{111\}\langle 112 \rangle$, которые действительно наблюдаются в центральных слоях горячекатаных полос (рис. 1, е–з, к–м) [7].

При горячей прокатке [11] за счет «мгновенного прилипания» поверхности полосы к валкам вследствие трения в поверхностных слоях также реализуется одноосное напряженное состояние – сжатие, результатом которого является приобретение зернами устойчивых ориентировок $(110)[001]$, $\{110\}\langle 112 \rangle$, $\{112\}\langle 111 \rangle$, $\{110\}\langle 111 \rangle$.

Таким образом, текстура поверхностного слоя, сформированная набором дискретных ориентировок, в основном полученных в результате рекристаллизации, является повернутой на 90° вокруг ПН текстурой

центрального слоя полосы, в основном сформированной набором деформационных ориентировок (рис. 1).

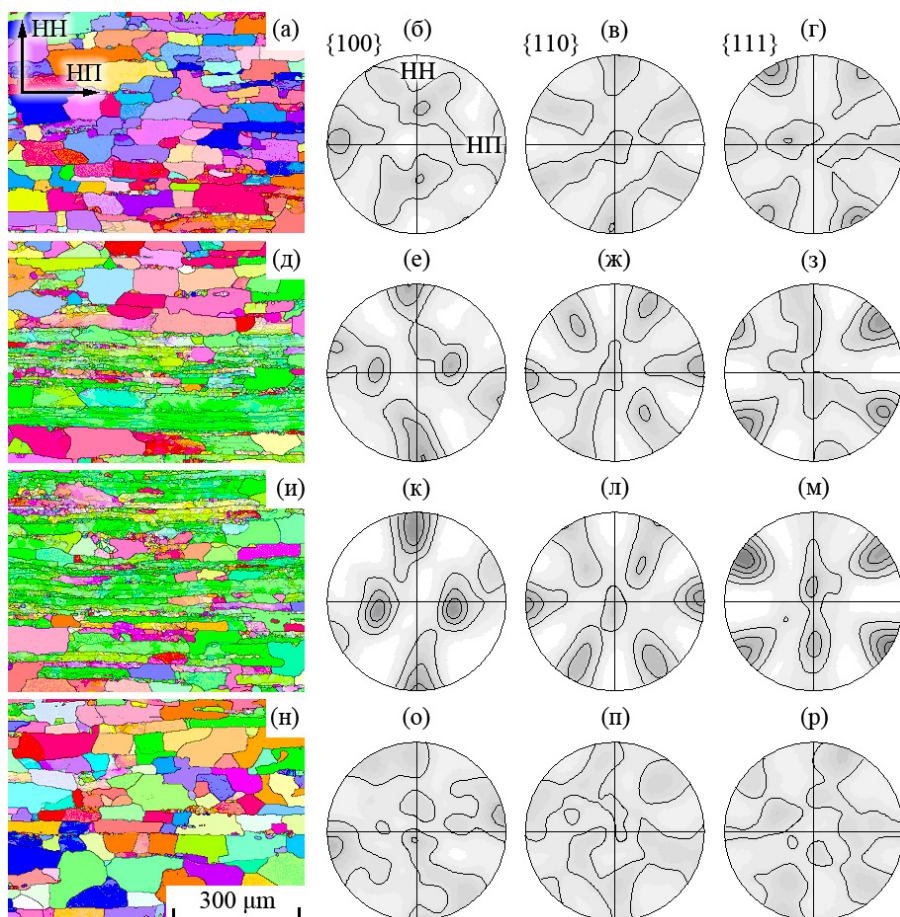


Рис. 1. Текстура (по толщине) образца (410 мм от кромки) горячекатаной полосы технического сплава Fe-3%Si. Ориентационные карты с НН (а, д, и, н) и соответствующие им полюсные фигуры (б–г, е–з, к–м, о–р).

Полюсные фигуры:

(б, е, к, о) $\{100\}$; (в, ж, л, н) $\{110\}$; (г, з, м, р) $\{111\}$

В центральной области (по толщине) образца (рис. 2, *а-г*), взятого с края горячекатаного листа, отсутствует подповерхностный слой с ориентировкой $\{110\}<001>$. Наиболее выраженной является ориентировка $\{112\}<101>$, доля которой в исследуемом образце 50...60 %. Такое состояние наблюдается на расстоянии до ~ 50 мм от кромок полосы.

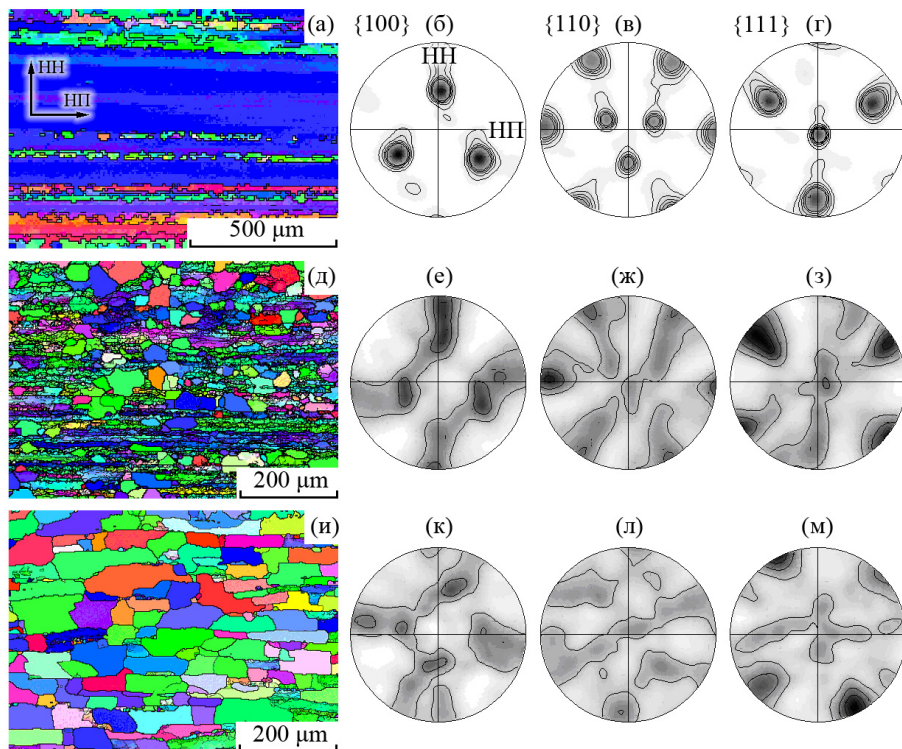


Рис. 2. Текстура, представленная в виде ориентационных карт с ПН (*а, д, и*) и соответствующих им ППФ полюсной плотности (*б-г, е-з, к-м*), полученная с поверхностной области (1/8 – 1/6 толщины) горячекатаной полосы технического сплава Fe-3%Si на расстоянии 5 мм (*а-г*), 35 мм (*д-з*), 410 мм (*и-м*) от кромки. Полюсные фигуры: (*б, е, к*) $\{100\}$; (*в, ж, л*) $\{110\}$; (*г, з, м*) $\{111\}$

Отличие кромочной области горячекатаной полосы заключается в возможности у материала «течь» в поперечном направлении. Напряжения, возникающие в материале вследствие наличия поперечной со-

ставляющей силы трения, оказываются неуравновешенными и в процесс деформации должны включаться источники, испускающие дислокации, имеющие вектор Бюргерса, с компонентой, перпендикулярной НП и НН. По-видимому, данные системы скольжения «вращают» кристаллическую решетку зерен к наиболее стабильному состоянию (наиболее симметричному) для данного напряженного состояния, т. е. к ориентировке $\{112\}\langle 110\rangle$.

Выводы

Текстура горячекатаного технического сплава Fe-3%Si, как в поверхностном, так и в центральном слоях полосы, состоит из наборов стабильных ориентировок. Текстура поверхностного слоя, представленная в основном ориентировками рекристаллизации, является развернутой на 90° вокруг ПН текстурой центрального слоя, сформированной в основном набором деформационных ориентировок.

Текстура рекристаллизации, реализующейся в процессе горячей прокатки, преимущественно состоит из тех же ориентировок, что и текстура деформации. При этом изменяются ориентировки локальных областей.

При реализации поперечного течения материала в процессе горячей прокатки на кромках полосы в поверхностных слоях технического сплава Fe-3%Si формируется устойчивая ориентировка деформации $\{112\}\langle 110\rangle$. Процессы рекристаллизации на краях полосы практически не реализуются.

1. *Morito N., Komatsubara M., Shimizu Y.* History and recent development of grain oriented electrical steel at Kawasaki steel // Kawasaki steel technical report. 1998. Nr 39. October. P. 3–12.

2. *Ushigami Y, Mizokami M., Fujikura M., Kubota T., Fujii H., Murakami K.* Recent development of low-loss grain-oriented silicon steel // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2003. Vol. 254–255, Nr 20. P. 307–314.

3. *Günther K., Abbruzzese G., Fortunati S., Ligi G.* Recent Technology Developments in the Production of Grain-oriented Electrical Steel // Steel research int. 2005. Vol. 76, Nr 6. P. 413–421.

4. *Xia Z., Kang Y., Wang Q.* Developments in the production of grain-oriented electrical steel // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2008. Vol. 254–255. P. 307–314.

5. Лобанов М. Л., Русаков Г. М., Редикульцев А. А. Электротехническая анизотропная сталь. Ч. 1 : История развития / МиТОМ. 2011. № 7. С. 18–25.
6. Лобанов М. Л., Русаков Г. М., Редикульцев А. А. Электротехническая анизотропная сталь. Ч. 2: Современное состояние // МиТОМ. 2011. № 8. С. 3–7.
7. Shimizu Y., Ito Y., and Iida Y. Formation of the Goss Orientation near the Surface of 3 Pct Silicon Steel during Hot Rolling // Metallurgical Transactions A. 1986. Vol 17 a, Nr 8. P. 1323–1334.
8. Гольдштейн В. Я., Пащенко С. В., Гражданкин С. Н. и др. Структурообразование при горячей прокатке сплава Fe-3%Si // ФММ. 1980. Т. 50, № 6. С. 1213–1217.
9. Кононов А. А., Зотов О. Г., Шамигулин А. И. Распределение кристаллографических ориентировок в анизотропной электротехнической стали на прокатных переделах // МиТОМ. 2014. № 8. С. 49–53.
10. Matsuo M., Sakai T., Suga Y. Origin and Development of Through-the-Thickness Variations of Texture in the Processing of Grain-Oriented Silicon Steel // Met. Trans. 1986. Vol. 17A. August. P. 1313–1322.
11. Вишняков Я. Д., Бабарэко А. А. Теория образования текстур в металлах и сплавах. М., 1979. 343 с.
12. Штремель М. А. Прочность сплавов. Ч. 2. М., 1997. 525 с.
13. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М., 1972. 408 с.
14. Rusakov G. M., Lobanov M. L., Redikul'tsev A. A., and Kagan I. V. Reorientation of body-centered cubic single crystals in cold rolling // Steel in Translation. 2010. Vol. 40, Nr 3. P. 219–224.
15. Лифанов В. Ф. Прокатка трансформаторной стали. М., 1975. 200 с.
16. Hölscher M., Raabe D., and Lücke K. // Acla metali mater. 1994. Vol. 42. P. 879–886.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО СИНТЕЗА БОРИДА ТИТАНА

К. А. Ефимова, Г. В. Галевский, В. В. Руднева

Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк

Установлена возможность получения диборида титана в наностоянии из порошковых шихт титан – бор и диоксид титана – бор в условиях плазменных азотно-водородного и азотно-углеводородного потоков. Получены математические модели, предложен вероятный механизм образования диборида титана по схеме «пар – расплав – кристалл». Проведена комплексная физико-химическая аттестация диборида титана. Проанализированы технологические перспективы применения нанопорошка диборида титана в качестве основного компонента смачиваемого покрытия углеродсодержащих катодов.

The possibility of obtaining a nano-titanium diboride powder mix of titanium – boron and titanium dioxide – boron in a nitrogen plasma – hydrogen and nitrogen – hydrocarbon streams. The mathematical model proposed by the probable mechanism for the formation of titanium diboride on a «couples-melt-crystal». The complex physical-chemical certification titanium diboride. Analyzed technological application prospects nanopowder titanium diboride as the main component of the carbonaceous coating wettable cathodes.

Введение

Диборид титана TiB_2 – синтетический сверхтвёрдый, тугоплавкий, жаропрочный, износостойкий материал, востребованный для производства керметов, огнеупоров, защитных покрытий различного назначения. Сравнительно новым и значительным по объёму направлением является применение его в электролитическом производстве алюминия в качестве компонента смачиваемого покрытия катодов электролизеров, защищающего их от разрушающего воздействия криолитоглиноземного расплава [1, 2]. Для получения такого покрытия готовится водная суспензия, содержащая 68–70 % твёрдого (90 % – TiB_2 , 10 % – Al_2O_3). Физическая и химическая связь между коллоидными частицами Al_2O_3 и частицами TiB_2 в суспензии приводит к образованию вязкоэластичного желеподобного состояния. Такой материал не выделяет воду и ведет себя после сушки как твёрдый. Суспензию наносят распылением или окрашиванием с промежуточной сушкой воздухом после нанесения

каждого слоя. Общая продолжительность сушки составляет 24 часа. Покрытие толщиной 1,0–2,0 мм обеспечивает смачивание катода алюминием, имеет высокое сопротивление внедрению натрия, одновременно сочетает достаточную твердость, прочность на изгиб, износостойкость, сцепление с основой, способствует снижению катодного падения напряжения и повышению катодного выхода алюминия по току.

В зарубежной практике алюминиевого производства материалы для защитных катодных покрытий алюминиевых электролизеров поставляются фирмой «МОЛТЕК» и имеют торговые марки ТИНОР А, ТИНОР М и утолщенный ТИНОР. При толщине покрытия 1 мм расход TiB_2 составляет 2,3 кг/м² поверхности катода [2], что свидетельствует о необходимости дальнейшего развития технологической базы его производства. В настоящее время основным способом получения TiB_2 для смачиваемых катодных покрытий является самораспространяющийся высокотемпературный синтез [3]. Однако этот способ при относительной простоте технологического решения малопроизводителен и позволяет получать TiB_2 в виде достаточно крупного порошка с частицами размерного диапазона 3–10 мкм. Есть основания предполагать, что введение TiB_2 в состав суспензии в виде более тонкого порошка с размером частиц меньше или сопоставимым с размером частиц Al_2O_3 (0,1–1 мкм), будет способствовать повышению физико-механических и защитных свойств покрытия.

Цель исследования

В связи с этим целью настоящего исследования является разработка научных и технологических основ плазменного синтеза диборида титана, его физико-химическая аттестация, определение основных технологических показателей предлагаемого способа получения.

Плазменный синтез и характеристики диборида титана

По результатам моделирования взаимодействия сырьевого и плазменного потоков осуществлен выбор порошкообразного сырья и газов – восстановителя и теплоносителя, характеристики которого приведены в табл. 1.

Процесс синтеза диборида титана исследовался при мощности дугового разряда 80–150 кВт при расходе плазмообразующего газа $(4,6–9,0) \cdot 10^{-3}$ кг/с, что соответствует начальной температуре плазменного потока 5400–5500 К. Массовая расходная концентрация составляла 0,10 кг порошка / кг плазмообразующего газа. Закалка продуктов синтеза осуществлялась азотом, подаваемым через закалочное кольцо, установленное на выходе из реактора. Температура закалки регулировалась изменением длины реактора. Расход закалывающего газа составлял $(1,0 – 2,0) \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Таблица 1

**Основные характеристики порошкообразного сырья
и технологических газов**

Порошкообразное сырье и технологические газы	Содержание основного вещества, % не менее	Дисперсность, мкм
Тонкодисперсный порошок титана ПТМк	99,9	0,5–5
Диоксид титана пигментный Р-1 ГОСТ 9808-84, изм.	99,0	-1
Бор аморфный Б99	99,0	-1
Метан (природный газ)	93,6 (этан–3,0; пропан–2,18; бутан–1,18)	-
Технический водород ГОСТ 3022 – 80, изм	99,8	-
Технический азот ГОСТ 9293-74, изм.	99,5 (содержание кислорода не более 0,5)	-

Твердые продукты синтеза исследовались методами рентгеновского, химического, масс-спектрометрического, электронно-микроскопического, термогравиметрического анализов и методом БЭТ. Для решения различных задач исследования анализировались образцы, отобранные для предотвращения контакта с воздухом из плазменного потока металлическим водоохлаждаемым зондом, а также образцы нанопорошков из системы улавливания, отобранные после разгерметизации фильтров. Газообразные продукты и продукты термодесорбции исследовались хроматографическим методом.

Исследовались два технологических варианта с использованием шихт различных составов: 1 – ($Ti + B + H_2$), 2 – ($TiO_2 + CH_4 + B$). При этом оптимизировалось содержание в продуктах синтеза диборида титана. Получены следующие уравнения, описывающие зависимость содержания диборида титана от основных технологических факторов:

$$[TiB_2 (1)] = -412,41 + 0,09489T_0 + 2,196[B] + 0,1597\{H_2\} - 0,00061T_0[B]; \quad (1)$$

$$[TiB_2 (2)] = 4,59 + 0,0156 T_0 + 0,00213T_3 - 0,0688\{CH_4\} - 0,214[B] \cdot \{H_2\}, \quad (2)$$

где T_0 – начальная температура плазменного потока (5000–5400 К);

T_3 – температура закалки (2600–2800 К);

$[B]$ – содержание бора в шихте (100–120 % от стехиометрически необходимого);

$\{\text{CH}_4\}$ – количество восстановителя (метана) (100–120 % от стехиометрически необходимого);

$\{\text{H}_2\}$ – концентрация водорода в плазмообразующем газе (0–0,25 % об.).

Основные параметры синтеза и характеристики диборида титана представлены в табл. 2. Сопоставление двух вариантов синтеза позволяет выбрать в качестве более перспективного борирование титанового порошка. Нанопорошок диборида титана представлен агрегатами шаровидной формы размером 120–200 нм, образованных сообществом округлых частиц достаточного широкого размерного диапазона от 10 до 60 нм (рис. 1). Округлая форма наночастиц диборида титана показывает на возможность их образования по механизму «пар – расплав – кристалл», предположительно при взаимодействии «титанового» аэрозоля с бороводородами.

Предполагается, что по фазовому и химическому составу, уровню дисперсности, основным технологическим показателем предлагаемый способ получения диборида титана является конкурентоспособным и может занять лидирующее положение в производстве диборида для защитных смачиваемых алюминием катодных и гальванических композиционных покрытий [2, 4].

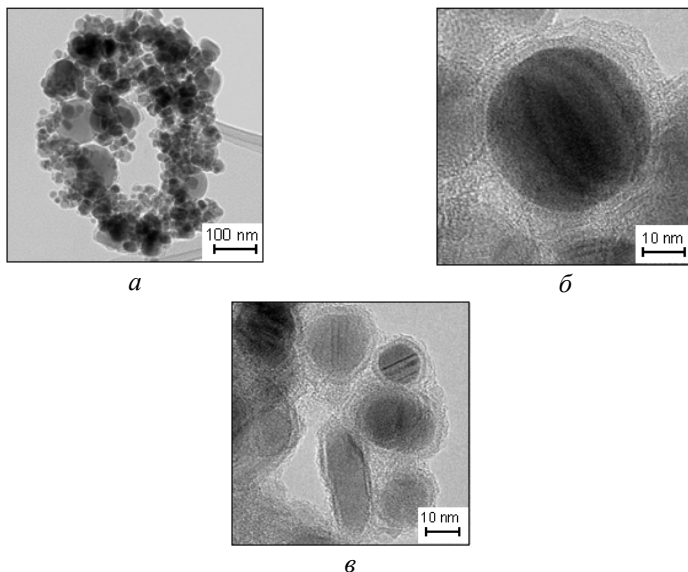


Рис. 1. Микрофотографии нанопоршка диборида титана:
a – ансамбль частиц и агрегатов; *б* – морфологическая картина агрегата; *в* – отдельные частицы

Таблица 2

Основные параметры синтеза и характеристики диборида титана

Параметры синтеза и характеристики диборида титана	Технологические варианты синтеза	
	1(Ti + B +H ₂)	2(TiO ₂ + B + CH ₄)
Состав газо-теплоносителя, % об.:		
– азот	74,0	
– водород	25,0	
– природный газ (метан)	1,0	
Крупность титаносодержащего сырья, мкм	0,5 ... 4,0	0,2 ... 1,0
Крупность борсодержащего сырья, мкм	0,25 ... 0,40	
Количество бора в порошкообразной шихте, % от стехиометрического	100–120	
Количество восстановителя (метана), % от стехиометрического	-	100–120
Начальная температура плазменного потока, К	5400	
Температура закалки, К	2600–2800	
Химический состав, %:		
– TiB ₂	92,0–93,0	90,05–91,30
– свободный бор	1,30–1,15	1,91–1,04
– титан свободный	1,91–1,45	-
– углерод свободный	-	1,42–0,92
– кислород	2,29–1,83	3,72–3,52
– азот	2,05–1,92	2,26–2,11
– летучие	0,45–0,65	0,64–1,11
Удельная поверхность, м ² /кг	46000–48000	35000–37000
Форма частиц	округлая	
Окисленность порошков $\times 10^7$, кг O ₂ /м ² удельной поверхности	3,82–4,98	9,51–10,63
Производительность по сырью, кг/ч	3,6	
Производительность по TiB ₂ , кг/ч	3,42	2,35
Интенсивность, кг/ч·м ³	1556	1070

Выводы

Установлена возможность получения диборида титана в наносостоянии из порошковых шихт титан – бор и диоксид титана – бор в условиях плазменных азотно-водородного и азотно-углеводородного потоков. Выявлен и обсужден механизм процессов боридообразования. Сопоставление двух вариантов синтеза позволяет выбрать в качестве более перспективного борирование титанового порошка. По фазовому и хи-

мическому составу, дисперсности диборида титана предлагаемый способ его получения является конкурентоспособным и может занять лидирующее положение в производстве этого материала для защитных смачиваемых алюминием катодных и гальванических композиционных покрытий.

-
1. *Галевский Г. В. и др.* Металлургия алюминия. Технология. Электроснабжение. Автоматизация. М., 2008. 528 с.
 2. *Serlire M., Oye H. A.* Cathodes in Aluminum Electrolysis. Dusseldorf, 2010. 698 p.
 3. *Чанг Х., Де Нора В., Секхар Дж. А.* Материалы, используемые в производстве алюминия методом Эру-Холл / пер. с англ. П. В. Полякова. Красноярск, 1998. 154 с.
 4. *Nozdrin I. V., Terenteva M. A., Galevski G. V., Rudneva V. V.* Features of Electrodeposition of «Nickel – Chromium Diboride Nanopowder» Composite Coatings // Russian J. of Non-Ferrous Metals. 2013. Vol. 54, Nr 5. P. 383–387.

Работа выполнена в СибГИУ в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России № 11.1531/2014/К.

СТРУКТУРНЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАНОПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ ГАЛЬВАНОСТАТИЧЕСКОМ АНОДИРОВАНИИ

Д. О. Ильин, А. С. Вохминцев, И. А. Вайнштейн

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Синтезированы мембраны анодированного оксида алюминия (АОА) толщиной 100 мкм в растворе щавелевой кислоты при постоянной плотности тока. Проведен температурный отжиг полученных образцов на воздухе в течение 5 часов в диапазоне 500–1250 °С. С помощью количественного анализа СЭМ-изображений поверхности синтезированных структур показано, что разброс среднего значения для диаметра пор составляет 78÷86 нм. Обнаружено, что в спектрах фотolumинесценции рентгеноаморфных мембран наблюдается широкая полоса свечения в области 2–3,5 эВ, связанная с кислород-дефицитными центрами F-типа. В образцах АОА, содержащих кристаллические α - и δ -фазы после высокотемпературного отжига при 1100–1250 °С, доминирует интенсивное красное свечение примесей Cr^{3+} (1,78 эВ) и Mn^{4+} (1,82 эВ).

Anodic aluminum oxide (AAO) membranes with 100 μm thickness were synthesized in oxalic acid solution under constant current density. Obtained samples were annealed in 500–1250 °C range for 5 h at air. Average pore diameter was evaluated using quantitative analysis of surface SEM images and appeared to be equal to 78÷86 nm. It was found there was a broad emission band in the 2–3,5 eV region of photoluminescence spectra due to F-type oxygen deficient centers in amorphous membranes. It was shown that intensive red emission caused by Cr^{3+} (1,78 eV) and Mn^{4+} (1,82 eV) impurities dominated in AAO samples with crystalline α - and δ -phases after high temperature annealing in 1100–1250 °C range.

Введение

В настоящее время нанопористый анодированный оксид алюминия (АОА) широко используется в качестве конструкционного и функционального материала в различных отраслях промышленности [1]. При этом АОА обладает рядом достоинств: пространственной периодичностью, высокой пористостью, цилиндрической формой пор, возможностью задания аспектного соотношения и контроля геометрических па-

раметров пористой структуры на этапе синтеза [2]. Исходные матрицы нанопористого АОА широко используются в качестве шаблонов при формировании как различных композитов, сочетающих свойства самого оксида и других материалов, так и в синтезе новых функциональных нульмерных и одномерных наноструктур заданного размера [3]. В этой связи знание изменения структурных и эмиссионных свойств мембран АОА при температурных воздействиях на стадии синтеза является актуальной задачей. Цель данной работы состояла в изучении влияния температуры отжига на геометрические параметры и фотолюминесцентные (ФЛ) свойства нанопористых мембран АОА.

Образцы и экспериментальные методики

В качестве исходного материала использовалась фольга из технического алюминия ($Al \geq 99,5\%$, основные примеси: Fe и $Si < 0,5\%$, $Mn \leq 0,05\%$, $Cr \leq 0,03\%$) толщиной 150 мкм [4]. Предварительно фольга отжигалась при температуре 500 °С в течение 5 ч для удаления дефектов прокатки. Из основного листа алюминий нарезался на пластинки размером 3,5 × 8 см. Перед анодированием они помещались в этанол, в ультразвуковую ванну на 10 мин. для обезжиривания поверхности. Электролитом являлся 3,6 вес. % раствор щавелевой кислоты. Первичное анодирование проводилось в гальваностатическом режиме при плотности тока $j = 20 \text{ мА/см}^2$ в течение 15 мин. Затем оксидная пленка удалялась в растворе 35 г/л CrO_3 и 20 мл/л H_3PO_4 при 90 °С за 45–60 мин. Второе анодирование велось в тех же условиях, что и первое, в течение 4 ч.

Для отделения оксидного слоя от алюминиевой пластинки, подложки окунались в насыщенный раствор $CuCl_2$, после чего алюминий полностью растворялся. Наконец, мембраны АОА выдерживались в растворе ангидрида хрома и ортофосфорной кислоты при 90 °С в течение 5–10 мин. для удаления остаточных продуктов предыдущих реакций и промывались в дистиллированной воде. Полученные слои АОА толщиной 100 мкм отжигались на воздухе в течение 5 ч при различных температурах. Было синтезировано семь образцов: исходный, т. е. без отжига (1), 500 °С (2), 700 °С (3), 900 °С (4), 1100 °С (5), 1200 °С (6) и 1250 °С (7).

Изображение поверхности АОА было получено на сканирующем электронном микроскопе SIGMA VP с помощью InLens-детектора в режиме высокого вакуума. Была произведена количественная обработка размеров внешнего диаметра пор полученных образцов с помощью анализатора изображений SIAMS 700. Измерение ФЛ спектров проводилось с использованием люминесцентного спектрометра Perkin Elmer LS 55 в диапазоне фотонных энергий 1–3,5 эВ и при возбуждении в области 2,2–5,4 эВ. Спектры свечения и возбуждения для всех образцов

были измерены в режиме фосфоресценции со скоростью 120 нм/мин, величина входной и выходной щелей составляла 10 нм, для образцов 4–7 использовалась выходная щель 5 нм.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены СЭМ-снимки поверхности синтезированных образцов 1, 2 и 4. В ходе анализа СЭМ-снимков случайным образом выбирались 100 пор для каждого изображения. Для всех исследуемых образцов оценивались значения величины минимального D_{\min} , максимального D_{\max} и среднего $D_{\text{ср}}$ диаметра пор. Полученные результаты сведены в табл. 1. На рис. 2 представлены также гистограммы распределения пор по диаметру. Значение $D_{\text{ср}}$ практически не изменяется и находится в диапазоне от 78,2 нм до 86,4 нм.

Таблица 1

Геометрические параметры полученных структур АОА

Температура отжига, °С	D_{\min} , нм	D_{\max} , нм	$D_{\text{ср}}$, ± 10 нм
–	58,2	98,9	78,2
500	62,6	114,5	86,4
900	57,8	106,8	81,9

На рис. 3 представлены измеренные спектры ФЛ для всех синтезированных образцов. В предыдущих работах было установлено, что при повышении температуры отжига происходит качественное изменение фазового состава мембран АОА в следующем порядке: аморфный \rightarrow Al_2O_3 (кубический) \rightarrow $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [5]. Видно, что между группами образцов с аморфной структурой (образцы 1–3), переходной кубической решеткой (образец 4) и присутствием $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (образцы 5–7) наблюдается значительное различие зарегистрированных спектров по форме и положению пиков. Для образца 1 наблюдается широкая полоса с максимумом в области 2,82 эВ. Для ФЛ-спектров образцов 2 и 3 наблюдается синий сдвиг со смещением положения пика сначала в 2,92 эВ, а затем – 3,11 эВ. Отметим, что в образцах 1–3 свечение возбуждалось фотонами с энергией 4,45 эВ. Для образца 4 имеет место широкий пик в области 2,44 эВ при возбуждении в полосу 5,35 эВ. В ФЛ-спектрах образцов 5–7 наблюдаются интенсивный узкий пик в 1,82 эВ с дополнительным максимумом 1,78 эВ, которые затем смещаются в 1,88 и 1,84 эВ соответственно. Для всех кристаллизовавшихся образцов люминесценция возбуждалась фотонами с энергией 3,89 эВ.

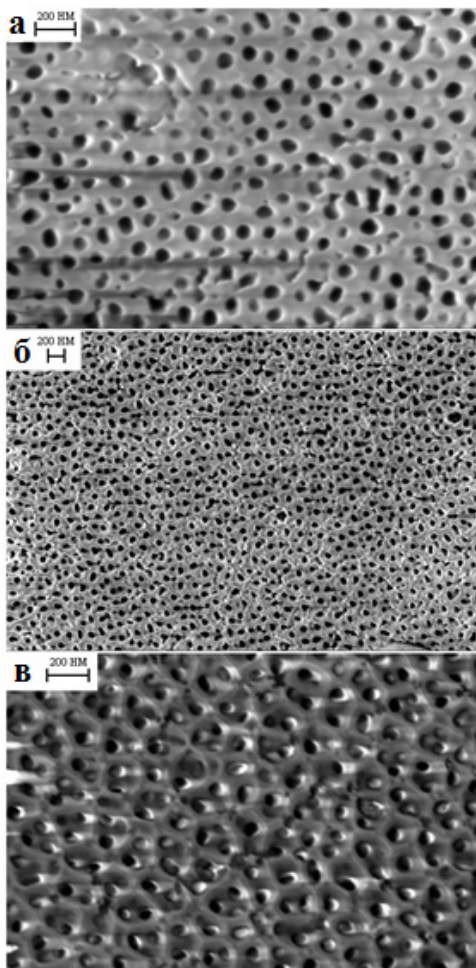


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности образцов АОА:
a – без отжига; *б* – после отжига при 500 °С; *в* – после отжига при 900 °С

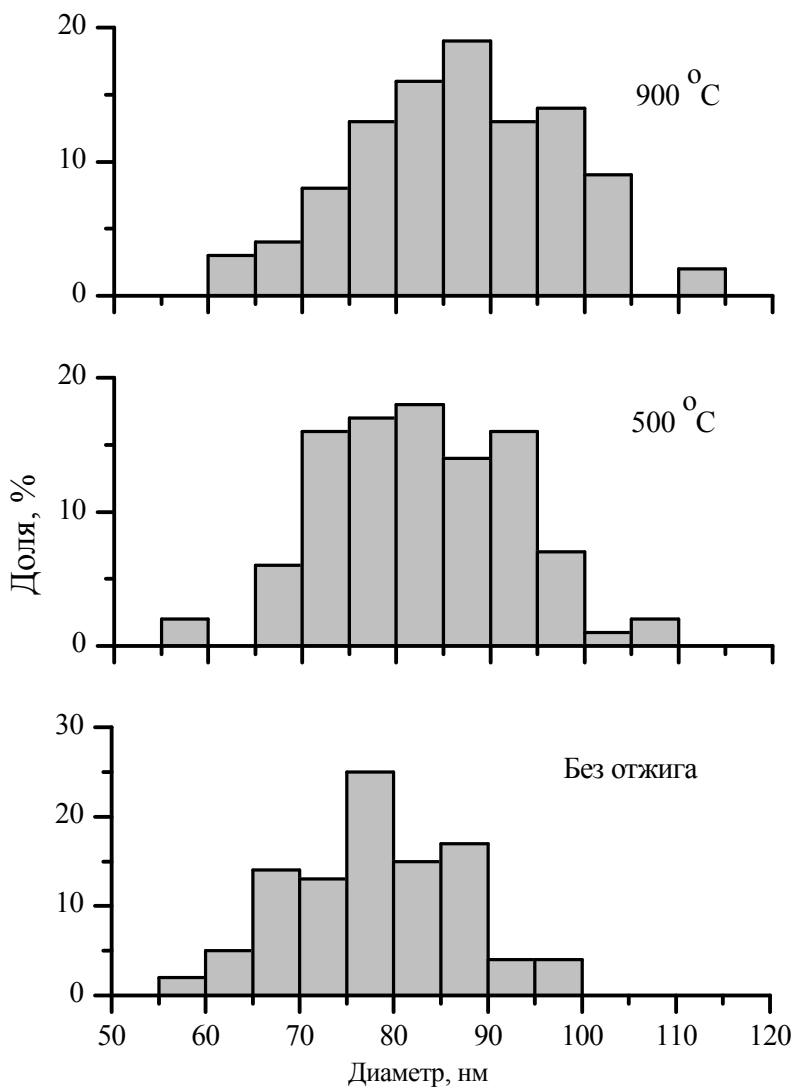


Рис. 2. Распределения пор по диаметру для образцов АОА после отжига при различных температурах

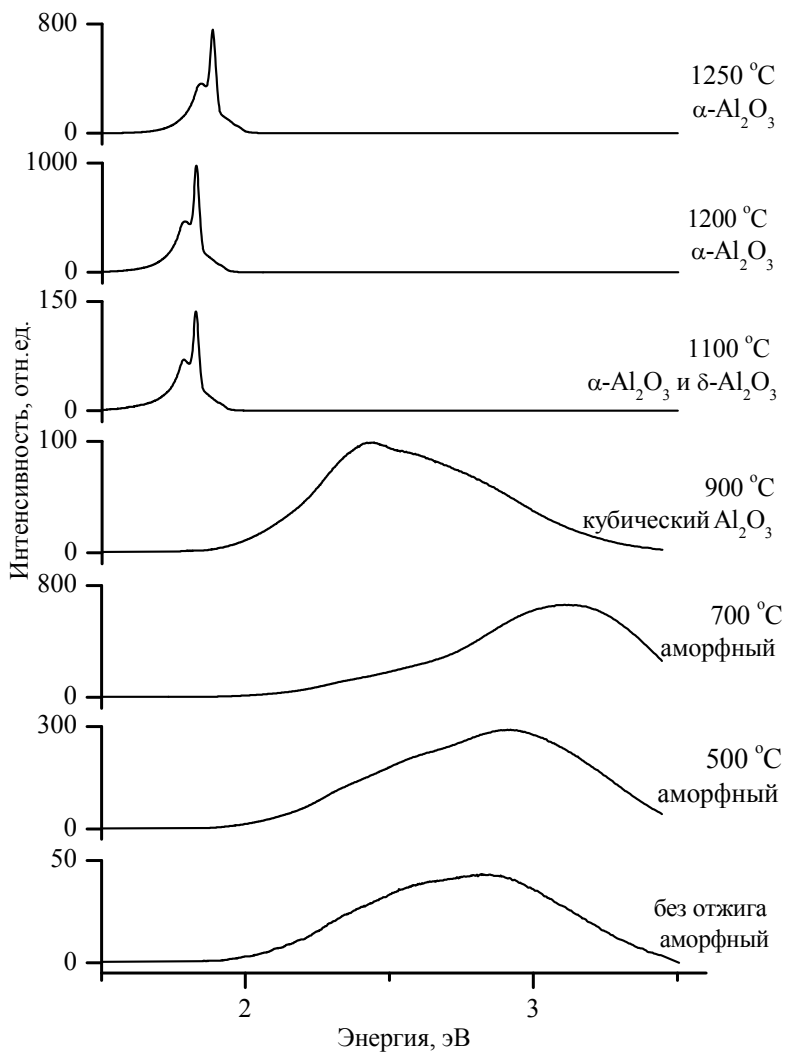


Рис. 3. Спектры КЛ для образцов АОА после отжига при различных температурах

Известно, что люминесцирующими центрами в неотожженных слоях АОА являются кислородные вакансии (F^- , F^{+} , F_2 -центры и т. д.) и примесные комплексы, формирующиеся в оксидном слое в ходе электрохимического окисления [6–8]. Вследствие различного соотношения этих дефектов в аморфной структуре положение максимума полосы свечения может варьироваться в зависимости от доминирования тех или иных элементарных компонент, что и наблюдается для образцов 1–3. Эмиссионная активность центров F -типа играет заметную роль во многих свойствах и объемных монокристаллах оксида алюминия, предопределяя, в частности, их высокую чувствительность для дозиметрических приложений [9–11]. Отметим, что при формировании кристаллической структуры (образцы 4–7) в АОА начинает преобладать примесная люминесценция в области 1,78 и 1,82 эВ, связанная с ионами Cr^{3+} и Mn^{4+} [12] соответственно. Указанные примеси присутствуют в исходной алюминиевой фольге. Наблюдаемая трансформация спектров ФЛ в мембранах АОА в зависимости от температуры отжига вполне согласуется с изменением их катодолюминесцентных свойств, которые были изучены нами ранее [5].

Заключение

В настоящей работе методами сканирующей электронной микроскопии и фотолюминесцентной спектроскопии выполнены исследования нанопористых структур АОА, полученных двойным анодированием в щавелевой кислоте. Проведен количественный анализ распределения пор по диаметру. Рассчитаны минимальные, максимальные и средние значения для указанной геометрической характеристики. Показано, что температурный отжиг мембран АОА в диапазоне 500–1250 °С существенно не влияет на величину пор, средний диаметр которых составляет 78,2÷86,4 нм.

Установлено, что трансформация измеренных люминесцентных спектров связана с изменением фазового состава синтезированных оксидных структур вследствие варьирования условий отжига. Проанализированные экспериментальные данные позволяют утверждать, что в нанопористом АОА с рентгеноаморфной структурой преобладает люминесценция в области 2–3,5 эВ, обусловленная центрами на основе анионных вакансий (F^- , F^{+} , F_2 -центры и т. д.). При кристаллизации анодированного оксида до $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при 1100 °С и выше доминирует интенсивная примесная фотолюминесценция в красной области, связанная с ионами Cr^{3+} (1,78 эВ) и Mn^{4+} (1,82 эВ).

1. *Schmid G.* Materials in nanoporous alumina. // Chem. 2002. Nr 12. P. 1231–1238.
2. *Mad. Jani A. M., Losic D., Voelcker N. H.* Nanoporous anodic aluminium oxide: Advances in surface engineering and emerging applications // Prog. Mater. Sci. 2013. Nr 58 (5). P. 636–704.
3. *Huczko A.* Template-based synthesis of nanomaterials // Appl. Phys. A. 2000. Nr 70. P. 365–376.
4. ГОСТ 618-73. Фольга алюминиевая для технических целей. Технические условия. М., 2002. 10 с.
5. *Ильин Д. О., Вохминцев А. С., Чукин А. В., Вайнштейн И. А.* Влияние температурного отжига на катодолуминесцентные свойства нанопористого оксида алюминия // Физика. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. / отв. ред. Н. Ю. Марчук, Екатеринбург, 2015. 443 (2) с. (в печати).
6. *Ning X., Kai-di M., Qian W.* The photoluminescence and thermoluminescence properties of nanoporous alumina films which processed in different annealing conditions // Eighth International Conference on Thin Film Physics and Applications. Proc. of SPIE. 2013. Vol. 9068. P. 906811–1–12.
7. *Gao T., Meng G., Zhang L.* Blue luminescence in porous anodic alumina films : the role of the oxalic impurities // J. Phys. : Condens. Matter. 2003. Nr 15. P. 2071–2079.
8. *Мухуров Н. И.* Фотолуминесценция F-центров в пленках анодного оксида алюминия // Журн. прикладной спектроскопии. 2010. Т. 77, № 4. С. 591–595.
9. *Вайнштейн И. А., Кортков В. С.* Температурное поведение полосы 6.05 eV в спектрах оптического поглощения кислород-дефицитного корунда // ФТТ. 2000. Т. 42, вып. 7. С. 1223–1229.
10. *Weinstein I. A., Pelenyov V. E.* F - \Rightarrow F+-centers transformations in mechanisms of sensitization of TLD-500 // Radiation Measurements. 2004. Vol. 38 (4–6). P. 421–425.
11. *Weinstein I. A., Kortov V. S., Vohmintsev A. S.* The compensation effect during luminescence of anion centers in aluminum oxide // J. Luminescence. 2007. Nr 122–123 (1–2). P. 342–344.
12. *Гасенкова И. В., Мухуров Н. И., Жвавый С. П.* Фотолуминесценция анодного оксида алюминия в α -фазе // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы : сб. докл. Междунар. симп. (Минск, 10–12 апр. 2013 г.) : в 2 ч. Ч. 2. Минск, 2013. С. 225–229.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ И ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

¹А. Т. Канаев, ²А. В. Богомолов

Казахский агротехнический университет, Астана, Казахстан
Павлодарский государственный университет, Павлодар, Казахстан

Для уточненной оценки конструктивной прочности арматурной стали проведены испытания арматурных стержней на коррозионную стойкость. Исследование коррозионной стойкости упрочненной углеродистой стали по сравнению с горячекатаной легированной связано с различием в структурах и как следствие, отличием в скорости электрохимических процессов, протекающих при работе стальной арматуры в бетоне. Структура стали Ст.5сп класса Ат-IIIС (А400) в поверхностной зоне имеет значительно меньшую скорость коррозии, чем структура стали 35ГС того же класса прочности.

Increase of corrosion resistance of the strengthened carbonaceous steel in comparison with the hot-rolled low-alloyed is connected with distinction in structures, and as a result, difference in the speed of the electrochemical processes proceeding when finding steel in concrete. The structure of steel St5sp a class of durability At-IIIС (A400) in a superficial zone has considerably the smaller speed of corrosion, than ferritno-perlitny structure of steel 35GS a class of durability At-IIIС (A400).

Развитие промышленного и гражданского строительства в нашей стране, особенно в северных районах с суровыми климатическими условиями, а также отдельные случаи разрушения железобетонных конструкций вследствие разрыва арматурных стержней вызывают необходимость исследований проблемы конструктивной прочности арматуры и выработки дополнительных требований к ее свойствам.

Материалом для исследования служили арматурные стали марок Ст.5сп, Ст.5сп, 35ГС диаметром 14 мм сортопрокатного производства Карагандинского металлургического комбината (Арселор Миттал Темиртау). Выбор арматурного профиля диаметром 14 мм обусловлен следующими соображениями: профиль № 14 один из самых массовых профилей производства, это минимальный профиль, из которого можно изготовить стандартный ударный образец максимального сечения. Кроме того, профиль № 14 – средний профиль из сортамента арматуры

диаметром 10–18 мм, подвергающийся упрочнению на класс прочности А400. Углеродистую сталь марок Ст.5пс и Ст.5сп упрочняли на класс прочности А400 по технологии совмещенной деформационно-термической обработки в технологическом потоке прокатки. Арматурные стержни из горячекатаной низколегированной стали использовали для сравнительных испытаний.

Исследования коррозионной стойкости выполнены на сталях, химический состав которых приведен в табл. 1.

Следует отметить, что при оценке свойств металлических материалов необходимо учитывать критерии оценки конструктивной прочности материала. Они характеризуют работоспособность материала в условиях эксплуатации. Эти критерии находятся в наиболее полной корреляции со служебными свойствами изделия. [1].

Таблица 1

Химический состав исследованных сталей, %

Марка стали	Состояние	С	Мп	Si	Cr	S	P
35ГС	Горячекатаное	0,31	1,12	0,86	0,19	0,034	0,023
Ст.5сп	Термоупрочненное	0,34	0,70	0,21	-	0,023	0,012
Ст.5пс	Термоупрочненное	0,35	0,77	0,15	-	0,036	0,011

Коррозионную стойкость арматуры определяли не только в бетоне и растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$, имитирующем жидкую фазу цементного камня, но и в средах, позволяющих ужесточить условия испытания и оценить действие агрессивных промышленных сред на поведение арматуры (сульфаты и хлориды). Влияние сульфатов на коррозию арматуры определяли гравиметрическим методом при 72-часовом травлении цилиндрических образцов в 10 % растворе серной кислоты. Воздействие хлоридов на арматуру определяли по электрохимическим характеристикам арматурных стержней, запрессованных в бетоне, периодически смачиваемом 10 % раствором соляной кислоты. Электрохимическое поведение стали в бетоне изучали на потенциометре снятием анодных и катодных поляризационных кривых и регистрацией во времени стационарного потенциала.

Арматурная сталь 35ГС класса прочности А400 преимущественно применяется как свариваемая арматура железобетонных конструкций и имеет механические свойства, превышающие расчетные характеристики, закладываемые в конструкции. Однако известны случаи их об-

рушения вследствие коррозии арматуры, хотя прочностные характеристики соответствовали требованиям ГОСТ 5781. Поэтому возникает необходимость оценки коррозионной стойкости арматурной стали.

Арматура считается стойкой против коррозионного растрескивания, если при напряжении в $0,9\sigma_{t0,2}$ время до разрушения превышает 100 ч. Как показали испытания по этой методике, время до разрушения образцов из стали Ст.5сп класса прочности А400 при 390 МПа составляет 120 ч, т.е. арматура класса прочности А400 считается коррозионно-стойкой.

Однако такая оценка склонности к коррозионному растрескиванию не может дать полной картины коррозионной стойкости стали, особенно в случаях воздействия агрессивных сред. Из практики известно, что незначительные дефекты на поверхности металла могут стать началом разрушения арматуры, а точечные язвы коррозии снижают прочностные характеристики на 20–30 %. Поэтому необходимо более широкое изучение не только коррозионного растрескивания, но и общей коррозии арматурных сталей, работы гальванопар, возникающей вследствие избирательного поражения поверхности металла агрессивными средами из-за возникновения контакта между арматурными стержнями и средой при оголении арматуры.

Известно, что бетон является защитной средой по отношению к арматуре и ее коррозия начинается после разрушения бетона или при наличии в нем трещины. Защитные свойства зависят как от химической природы бетона, так и от его проницаемости для агрессивных сред. Как отмечалось, скорость коррозии стали необходимо определять не только в растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$, имитирующем жидкую фазу цементного камня, но и в средах, позволяющих ужесточить условия испытания и оценить действие агрессивных промышленных сред на поведение арматуры, в частности, сульфатов и хлоридов.

Сульфаты присутствуют во многих природных, а также промышленных сточных водах. Растворы сульфатов вызывают коррозию бетонных и железобетонных конструкций, непосредственно соприкасающихся с ними. Хлориды содержатся в составляющих бетона, часто используются как добавки ускорения для твердения бетонной смеси. В табл. 2 приведены сравнительные данные по скорости коррозии в различных средах арматурных стержней диаметром 14 мм класса прочности А400.

Как следует из приведенных данных, в изученных средах (H_2SO_4 , NaCl) показатель коррозионной стойкости термически упрочненной стали Ст.5сп лучше, чем у горячекатаной стали 35ГС. Видно, что скорость коррозии в 3 % растворе поваренной соли, выбранной в качестве среды для испытания на коррозию, в термически упроч-

ненной углеродистой стали Ст.5сп на 60 % меньше, чем кремне-марганцовистой стали 35ГС.

Таблица 2

Коррозионная стойкость арматурных сталей класса прочности А400

Среда для испытания на коррозию	Марка стали	Скорость коррозии, мм/год	Балл стойкости по шкале	Категория коррозионной стойкости
H ₂ SO ₄	35ГС	0,37	2	Стойкие
	Ст5сп	0,30	2	Стойкие
NaCl	35ГС	1,28	3	Пониженностойкие
	Ст5сп	0,77	2	Стойкие

Как известно, контактные коррозионные пары (анод – катод) возникают в случае электродов из разнородных металлов, причем в этом коррозионном процессе более благородный металл служит катодом, а менее благородный металл – анодом. Примечательно также, что такие контактные коррозионные пары возникают не только в случае массивных (макро-) электродов, но и в случае микроэлектродов, роль которых могут играть структурные и фазовые составляющие микроструктуры.

Микроструктурные коррозионные пары могут возникать из-за наличия напряженных участков поверхности. Обладая большой энергией, зоны с искаженной структурой (граница зерна, дислокации, вакансии, наклепанные зоны) могут играть роль анода, тогда как зона, свободная от напряжений или деформации, служит катодом.

Как известно, существование таких микроструктурных коррозионных пар способствует выявлению микроструктуры металлов и сплавов, так как границы зерен становятся видимы в результате преимущественного травления. Граница зерна играет роль анода (она больше растворяется при травлении раствором кислоты), так как обладает повышенной энергией.

Несовершенства структуры играют роль анодов, поскольку смежные участки обладают избыточной энергией деформации и окисление атомов этих смежных участков до ионов требует меньшей дополнительной энергии. В случае гетерогенных структур составы фаз, как правило, сильно различаются. Так, состав феррита (содержание углерода 0,006 %) и цемента (6,67 % С) в перлите неодинаков, то они имеют разные электродные потенциалы и образуют микрогальваническую пару.

Повышение коррозионной стойкости термически упрочненной стали по сравнению с горячекатаной низколегированной 35ГС связано с различием в структурах и, как следствие, с отличием в скорости электро-

химических процессов, протекающих при нахождении стали в бетоне. Как известно, гетерогенные структуры менее устойчивы к коррозионному разрушению, чем однородные структуры типа твердых растворов. В случае гетерогенных структур это обусловлено тем, что матрица работает как активный анод, а включения или частицы второй фазы работают как катод. Причем активность катода значительно зависит от формы и дисперсности включений. Так, пластинчатые структуры обладают более высоким сопротивлением коррозионному разрушению по сравнению с зернистыми. Минимальной устойчивостью к коррозии обладает структура троостита [2]. По-видимому, это определяется значительной дисперсностью карбидной фазы в троостите, что увеличивает число микропар анод – катод. Повышение температуры отпуска, приводящее к коагуляции цементита (карбидной фазы), а также к снятию внутренних напряжений, возникающих при закалке, обуславливает снижение склонности к коррозии.

Структура термоупрочненной стали Ст.5сп класса А400 в поверхностной зоне (сорбит отпуска) имеет значительно меньшую скорость коррозии, чем феррито-перлитная структура стали 35ГС класса прочности А400. Кроме того, следует учесть, что феррито-перлитная структура стали 35ГС является более электрохимически гетерогенной, и поэтому скорость анодных и катодных процессов, определяющих коррозионную стойкость, значительно выше, чем в более равновесной структуре стали Ст.5сп класса прочности А400, имеющих различную структуру на поверхности и в центре стержней.

Выводы

Показатели коррозионной стойкости термически упрочненных сталей лучше, чем у горячекатаной стали 35ГС. Сравнительный анализ показывает, что у сталей Ст.5пс и Ст.5сп положительный потенциал арматуры, меньшая площадь пораженной поверхности, малая пористость общей коррозии и, что особенно важно, значительно меньше размер коррозионных пор, которые могут служить центрами зарождения трещин.

-
1. *Канаев А. Т.* Повышение качества сортового проката совмещенной деформационно-термической обработкой. Астана, 2009. 180 с.
 2. *Бернштейн М. Л. Займовский В. А.* Структура и механические свойства металлов. М., 1980. 472 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОРОШКА ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА ОТ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Д. М. Караваев, Е. В. Матыгуллина, А. М. Ханов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь

Описаны измельчитель и устройство для определения насыпной плотности пористых материалов. Устройства, описанные в статье, запатентованы. Измельчение проводили циклами. Исследования проведены в соответствии с методикой планирования экспериментов, в рамках полного факторного эксперимента 2². Для исследования выбраны два фактора: скорость вращения гладких элементов измельчителя и время цикла. Получены регрессионные уравнения.

Grinder and apparatus for determining the bulk density of the porous material are described. The devices described in this article are patented. Grinding was performed in cycles. Investigations conducted in accordance with the methodology of design of experiments, in the context of a full factorial experiment 2². Two factors are selected for studies: the rotational speed of smooth grinder elements and cycle time. The regression equation are obtained.

Насыпная плотность порошка определяется плотностью материала порошка, размером и формой его частиц, плотностью укладки частиц и состоянием их поверхности [1]. Насыпная плотность является одним из важнейших технологических свойств порошковых материалов, от которого зависит высота матрицы пресс-формы и сам процесс прессования [2].

Терморасширенный графит-пух (ТРГ-пух), использующийся в качестве исходного материала при производстве термостойких до 550 °С композиционных материалов [3, 4], занимает значительный объем в пространстве, легок, воздушен, так как это высокопористая система с сложной организацией структуры [5, 6]. ТРГ-пух имеет насыпную плотность 1–4 кг/м³ и удельную поверхность 30–80 г/м² в зависимости от морфологических особенностей исходного графита [7].

В работе [2] установлено, что измельчение ТРГ-пуха необходимо проводить в две стадии. На 1-й стадии измельчения при использовании измельчителя с гладкой поверхностью длина червеобразных частиц ТРГ уменьшается за счет их излома в перенапряженных, де-

фектных местах. На 2-й стадии измельчение проводится инструментом с режущими кромками.

Целью работы является экспериментальное установление зависимости насыпной плотности порошка терморасширенного графита от продолжительности цикла измельчения $t_{ц}$ и скорости вращения элементов измельчителя n с гладкой поверхностью (1-я стадия) и с режущими кромками (2-я стадия).

Измельчение исходного ТРГ-пуха с насыпной плотностью $4,0 \pm 0,2 \text{ кг/м}^3$ проводили в две стадии на запатентованном устройстве – измельчителе [8], имеющем 2 камеры измельчения (рис. 1). Измельчение проводили циклами, в конце каждого измеряли насыпную плотность порошка ТРГ.

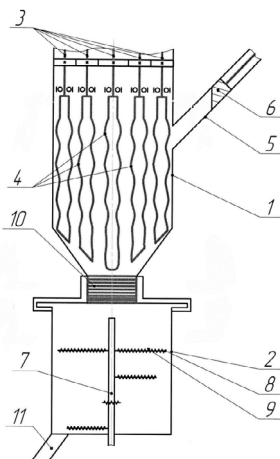


Рис. 1. Измельчитель

На рис. 1 показана геометрия измельчителя. Измельчитель состоит из корпуса загрузочного бункера 1, соединенного с корпусом цилиндрической камеры размола 2. Загрузочный бункер 1 выполнен в виде закрытой камеры, в которой вертикально размещен ротор 3 с элементами измельчителя 4. Элементы измельчителя 4 выполнены в виде спиралеобразных петель с гладкой поверхностью и установлены с возможностью разнонаправленного вращения относительно друг друга. К загрузочному бункеру 1 подведен загрузчик 5, выполненный в виде трубопровода с размещенным внутри поршнем 6. Камера размола 2 размещена соосно под загрузочным бункером 1. В камере размола 2 на вертикальном валу размещен ротор 7, а элементы измельчителя 8 выполнены в виде многорядной системы горизонтально закрепленных ножей [8].

Насыпную плотность определяли на специальном устройстве [9], показанном на рис. 2 а, б.

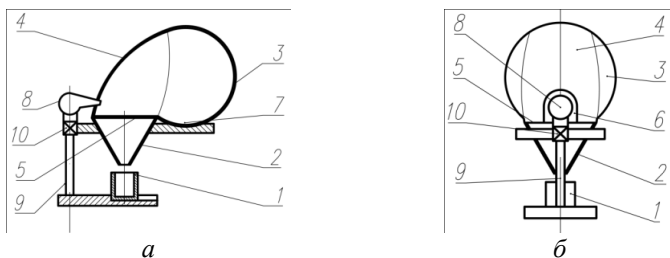


Рис. 2. Устройство для определения насыпной плотности пористых материалов: а – главный вид; б – вид сбоку

Устройство содержит мерный цилиндр 1, выполненный по ГОСТу 1770, воронку 2 стеклянную, выполненную по ГОСТу 25336 с цилиндрической частью, имеющей внутренний диаметр 20 мм, часть емкости 3, часть емкости 4 с исследуемым материалом. Воронка 2 размещена над мерным цилиндром 1 на расстоянии 35 мм от его торца. Емкость с исследуемым материалом выполнена переменного сечения из двух частей, плавно переходящих одна в другую. Причем одна часть 3 выполнена шарообразной формы, вторая часть 4 – в виде куполообразного козырька, имеющего открытое круглое основание 5, диаметр которого равен большему диаметру воронки 2. Круглое основание козырька части емкости 4 плотно соединено с большим основанием воронки 2. В нижней боковой части емкости 4 куполообразного козырька выполнено сквозное отверстие 6. Шарообразная часть емкости 3, примыкающая к основанию куполообразного козырька 4, является приемником 7, поступающих при отборе проб исследуемых частиц материала. Устройство снабжено соплом 8, закрепленным на штативе 9 шарнирно или гибким элементом 10, с возможностью перемещения по штативу 9 к заданному участку в части емкости 4 или к кромке мерного цилиндра 1. Сопло 8 установлено на штативе 9 с возможностью вхождения выходной части сопла в сквозное отверстие 6, выполненное в нижней боковой части куполообразного козырька емкости 4. Выходная часть сопла 8 выполнена с возможностью перемещения в части емкости 4 под разными углами.

Исследования проводили в соответствии с методикой планирования экспериментов. Каждую из серий испытаний выполняли в рамках полного факторного эксперимента. Факторы – скорость вращения гладких элементов измельчителя (n) и время цикла ($t_{\text{ц}}$) – задавали на двух уровнях (минимальном и максимальном). Каждый эксперимент при выбран-

ной комбинации параметров n и $t_{\text{ц}}$ повторяли по 3 раза. Опыты рандомизировали во времени, чтобы исключить влияние случайных ошибок, вызванных внешними условиями.

Для построения зависимости насыпной плотности от параметров измельчения n и $t_{\text{ц}}$ использовали математическую модель первого порядка в виде полинома [10].

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j. \quad (1)$$

В этом случае факторы кодируются по формуле

$$X_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (2)$$

где X_i – кодовое значение i -го фактора; x_i – натуральное текущее значение i -го фактора; x_{i0} – начальный (нулевой) уровень фактора; Δx_i – интервал варьирования i -го фактора:

$$\Delta x_i = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{2}. \quad (3)$$

Значения выбранных уровней варьируемых факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни варьирования факторов

№ п/п	Уровень варьиру- емых факторов	Обозначение кодовое	$n, \text{мин}^{-1}$	$t_{\text{ц}}, \text{с}$
			X_1	X_2
1-я стадия – измельчение элементами с гладкой поверхностью				
1	Основной	0	600	10
2	Интервал варьирования	Δx	200	5
3	Нижний	-1	400	5
4	Верхний	+1	800	15
2-я стадия – измельчение элементами с режущими кромками				
5	Основной	0	1050	10
6	Интервал варьирования	Δx	350	5
7	Нижний	-1	700	5
8	Верхний	+1	1400	15

Матрица планирования для экспериментального плана 2^2 представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	\bar{Y}_u
1-я стадия – измельчение элементами с гладкой поверхностью								
1	+1	-1	-1	+1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	\bar{Y}_1
2	+1	+1	-1	-1	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	\bar{Y}_2
3	+1	-1	+1	-1	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	\bar{Y}_3
4	+1	+1	+1	+1	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}	\bar{Y}_4
2-я стадия – измельчение элементами с режущими кромками								
5	+1	-1	-1	+1	Y_{15}	Y_{16}	Y_{17}	\bar{Y}_5
6	+1	+1	-1	-1	Y_{16}	Y_{17}	Y_{18}	\bar{Y}_6
7	+1	-1	+1	-1	Y_{17}	Y_{18}	Y_{19}	\bar{Y}_7
8	+1	+1	+1	+1	Y_{18}	Y_{19}	Y_{20}	\bar{Y}_8

Результаты измельчения ТРГ элементами с гладкой поверхностью (1-я стадия) представлены на рис. 3, из которого видно, что насыпная плотность ТРГ увеличивается с увеличением времени измельчения до 90 с, дальнейшее увеличение времени измельчения до 120 с не влияет на величину насыпной плотности ТРГ. Значения насыпной плотности ТРГ, измельченного (за 120 с) элементами с гладкой поверхностью, сведены в табл. 3.

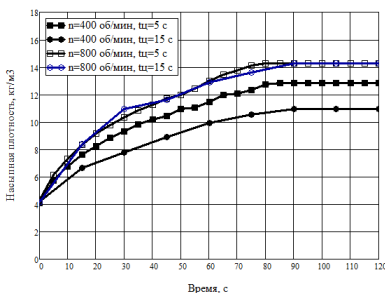


Рис. 3. Изменение насыпной плотности ТРГ в процессе измельчения элементами с гладкой поверхностью (1-я стадия)

Таблица 3

Результаты экспериментов

№ опыта	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	\bar{Y}_u	S^2	S_n	$W_{n\%}$	S_{ny}	Δy ($\alpha=0.95$)	\hat{y}_u
1	13,0	13,0	12,6	12,9	0,059	0,24	1,9	0,14	0,60	12,9

№ опы- та	$Y_{н1}$	$Y_{н2}$	$Y_{н3}$	$\bar{Y}_{н}$	S^2	S_n	W_n %	$S_{н\bar{y}}$	Δy ($\alpha=0,95$)	$\hat{y}_и$
2	14,4	14,4	13,9	14,3	0,089	0,30	2,1	0,17	0,74	14,3
3	10,8	11,1	10,8	10,9	0,032	0,18	1,6	0,10	0,44	10,9
4	14,4	14,4	13,9	14,3	0,089	0,30	2,1	0,17	0,74	14,3
**	13,0	13,0	13,4	13,1	0,067	0,26	2,0	0,15	0,64	13,1

В табл. 3 кроме результатов экспериментов представлены результаты их статистической обработки, а именно: средние значения насыпной плотности – $\bar{Y}_{н}$, дисперсия параллельных опытов – S^2 , средняя квадратичная ошибка одиночного результата при n измерениях – S_n , коэффициент вариации – W_n , средняя квадратичная ошибка среднего арифметического – $S_{н\bar{y}}$, доверительный интервал среднего арифметического – Δy , расчетные значения насыпной плотности – $\hat{y}_и$, найденные по уравнению регрессии.

Статистическая обработка данных, полученной насыпной плотности, показала, что дисперсия параллельных опытов не превышала $S^2 \leq 0,089$. Для определения возможности регрессионного анализа рассчитали однородность дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена [10]. Так как расчетное значение критерия Кохрена $Gr = 0,331$ меньше табличного $G_{табл} = 0,7679$ [11], при уровне значимости $\alpha = 0,05$, то гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается и, значит, возможно проведение регрессионного анализа.

Рассчитав коэффициенты уравнения (1), получили уравнение регрессии

$$\hat{y} = 13.1 + 1.2X_1 - 0.5X_2 + 0.5X_1X_2. \quad (4)$$

Проверку статистической значимости коэффициентов проводили с помощью t -критерия Стьюдента. Все коэффициенты уравнения (4) статистически значимы при уровне значимости 0,05 и имеют доверительный интервал $\pm 0,172$.

Для проверки гипотезы об адекватности уравнение регрессии (модели) по F -критерию Фишера необходимо, чтобы число независимых опытов было больше числа значимых коэффициентов уравнения, включая свободный член. Поэтому дополнительно провели опыт на основном уровне варьирования факторов, т. е. при $n = 600 \text{ мин.}^{-1}$ и $t_{ц} = 10 \text{ с}$, который повторили 3 раза. Результаты опыта внесли в табл. 3 в строку **. Так как расчетный критерий Фишера $F_r = 0,335$ меньше 1, то уравнение (4) адекватно [10].

Для приведения уравнения (4) к виду с натуральными значениями факторов использовали формулу кодирования (2), подставляя в уравнение (4) вместо кодовых натуральные значения факторов [10]:

$$\rho = 13.5 + 10^{-3}x_1 - 0.4x_2 + 5 \times 10^{-3}x_1x_2. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует:

- с увеличением скорости вращения гладких элементов измельчителя насыпная плотность порошка терморасширенного графита возрастает;

- при скорости вращения гладких элементов измельчителя от 400 мин.⁻¹ до 800 мин.⁻¹, чем больше время цикла измельчения, тем меньше насыпная плотность порошка терморасширенного графита;

- при скорости вращения гладких элементов измельчителя 800 мин.⁻¹ увеличение времени цикла измельчения не влияет на насыпную плотность порошка терморасширенного графита.

Результаты измельчения в камере размала 2 (рис. 1) элементами с режущими кромками ТРГ насыпной плотностью 14±1 кг/м³, полученного в бункере 1 при скорости вращения гладких элементов измельчителя 800 мин.⁻¹, представлены на рис. 4, где видно, что насыпная плотность ТРГ увеличивается с увеличением времени измельчения до 53±2 кг/м³, дальнейшее увеличение времени измельчения не влияет на величину насыпной плотности ТРГ, т. к. уровень порошка ТРГ в камере размала становится ниже уровня элементов с режущими кромками (ножей). Значения насыпной плотности ТРГ, измельченного (за 60 с) элементами с режущими кромками, сведены в табл. 4.

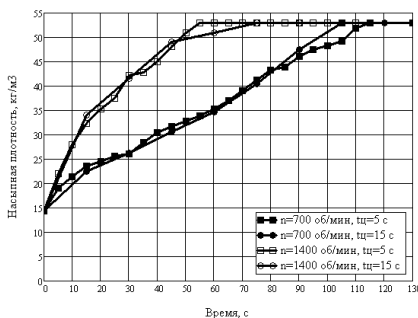


Рис. 4. Изменение насыпной плотности ТРГ в процессе измельчения элементами с режущими кромками (2-я стадия)

Таблица 4

Результаты экспериментов

№ опыта	y_{n1}	y_{n2}	y_{n3}	\bar{y}_n	S^2	S_n	$W_n, \%$	S_{ny}	Δy ($\alpha=0,95$)	\hat{y}_u
5	40,9	32,5	31,5	35,0	26,7	5,2	14,8	3,0	12,8	34,7
6	52,9	52,9	52,9	52,9	0	0	0	0	0	51,5
7	32,5	39,1	32,5	34,7	14,5	3,8	11,0	2,2	9,5	34,7
8	49,9	49,9	52,9	50,9	3,0	1,7	3,4	1,0	4,3	51,5
***	42,8	39,1	47,2	43,0	16,4	4,1	9,4	2,3	10,1	43,1

Статистическая обработка данных полученной насыпной плотности показала, что дисперсия параллельных опытов не превышала $S^2 \leq 26,7$. Для определения возможности регрессионного анализа рассчитали однородность дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена [10]. Так как расчетное значение критерия Кохрена $Gp = 0,634$ меньше табличного $G_{\text{табл}} = 0,7679$ [11], при уровне значимости $\alpha = 0,05$, то гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается и, значит, возможно проведение регрессионного анализа.

Рассчитав коэффициенты уравнения (1), получили уравнение регрессии:

$$\hat{y} = 43.4 + 8.5x_1 - 0.6x_2 - 0.4x_3. \quad (6)$$

Проверку статистической значимости коэффициентов проводили с помощью t -критерия Стьюдента. Все коэффициенты уравнения (6), кроме b_1 и b_{12} , статистически значимы при уровне значимости 0,05 и имеют доверительный интервал $\pm 2,2$.

Дополнительно провели опыт на основном уровне варьирования факторов, т. е. при $n = 1050 \text{ мин.}^{-1}$ и $t_{\text{ц}} = 10 \text{ с}$, который повторили 3 раза. Результаты опыта внесли в табл. 4 в строку ***. Так как расчетный критерий Фишера $Fp = 0,592$ меньше 1, то уравнение (6) адекватно [10]. Для приведения уравнения (6) к виду с натуральными значениями факторов использовали формулу кодирования (2), подставляя в уравнение (6) вместо кодовых натуральные значения факторов [10]:

$$\hat{y} = 17.9 + 0.024x_1. \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что при одинаковом времени измельчения ТРГ насыпная плотность увеличивается, с увеличением скорости вращения измельчающих элементов с режущими кромками увеличивается.

Исследованы основные факторы, влияющие на насыпную плотность ТРГ при измельчении элементами с гладкой поверхностью и с режущи-

ми кромками. Приведены аналитические зависимости насыпной плотности терморасширенного графита от скорости вращения элементов измельчителя и продолжительности цикла измельчения.

1. Порошковая металлургия и напыленные покрытия : учебник для вузов / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. М., 1987. 792 с.
2. *Караваяев Д. М., Макарова Л. Е., Дегтярев А. И., Трошков К. В.* Определение насыпной плотности терморасширенного графита // Известия Самар. науч. Центра РАН. 2013. Т. 15, № 4(2). С. 360–362.
3. *Karavaev D., Khanov A.* Mechanical properties of expanded graphite / silicone resin composites // 14th SGEM GeoConference on Nano, Bio And Green – Technologies For A Sustainable Future. Conference Proceedings. 2014. June 19–25. Vol. 1, Nr SGEM2014. P. 107–112.
4. *Karavaev D., Sirotenko L., and Matygullina E.* The tribological properties of expanded graphite / silicone resin composites // 14th SGEM GeoConference on Nano, Bio And Green – Technologies For A Sustainable Future. Nr. SGEM2014 Conference Proceedings. 2014. June 19–25. Vol. 1. P. 185–190.
5. *Ханов А. М., Макарова Л. Е., Дегтярев А. И., Караваяев Д. М., Москалев В. А., Нестеров А. А., Смирнов Д. В., Исаев О. Ю.* Особенности строения и использования терморасширенного графита // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2012. Т. 14, № 1. С. 92–106.
6. *Ханов А. М., Макарова Л. Е., Дегтярев А. И., Караваяев Д. М., Смирнов Д. В.* Особенности строения терморасширенного графита // Известия Самар. науч. центра РАН. 2011. Т. 13, № 4(4). С. 1119–1122.
7. *Белова М. Ю.* От черного мела к уплотнениям из ТРГ // Арматуростроение. 2008. № 1 (52). С. 36–43.
8. Пат. 2531608 Российская Федерация, МПК G01N 3/08 (2006.01). Измельчитель / А. М. Ханов, Д. М. Караваяев, Л. Е. Макарова, А. И. Дегтярев, В. А. Москалев, К. В. Трошков; патентообладатель Федер. гос. бюджет, образо-ват. учр. высш. проф. образования «Перм. нац. исслед. политехн. ун-т». № 2013121529/28; заявл. 07.05.2013; опубли. 27.10.14, Бюл. № 30. – 12 с.
9. Пат. 2544282 Российская Федерация, МПК G01N9/02 (2006.01). Устройство для определения насыпной плотности пористых материалов / А. М. Ханов, Д. М. Караваяев, Л. Е. Макарова, А. И. Дегтярев, В. А. Москалев, О. Ю. Исаев, Д.В. Смирнов; патентообладатель Федер. гос. бюджет, образоват. учр. высш. проф. образования «Перм. нац. исслед.

политехн. ун-т». № 2013143587/28; заявл. 26.09.13; опубл. 20.03.15, Бюл. № 8. 9 с.

10. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. Н. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М., 1980. 228 с.

11. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М., 1983. 416 с.

**Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию (проектная часть) № 9.1570.2014/К.*

МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ Fe-Cr-B, СТОЙКИЕ К АБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ И ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ

Ю. С. Коробов, М. А. Филиппов, С. В. Невежин
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Разработаны порошковые проволоки базовой системы легирования Fe-Cr-B, предназначенные для нанесения износо- и жаростойких покрытий методом дуговой металлизации. Проанализировано влияние дополнительного легирования проволок углеродом, кремнием и алюминием на износостойкость и жаростойкость покрытий на основе изучения их фазового состава и микроструктуры. Износостойкость покрытий обеспечивается за счет упрочняющих фаз боридов Fe_2B и карбоборидов $(Fe, Cr)_2(B, C)$ и в несколько раз превышает износостойкость покрытий из сплошных проволок, таких как 20X13. Покрытия имеют жаростойкость одного уровня с аустенитными сталями, такими как 1X18H12T и на порядок выше, чем у перлитных и мартенситно-ферритных сталей, таких как 12X1МФ и 1X12B2МФ, за счет формирования на их поверхности, при высоких температурах, комплексных оксидов $(Fe, Al, Y)_2O_3$.

Cored wires of basing alloying system Fe-Cr-B for arc spraying were developed. The effect of such additives as carbon, silicon and aluminum on the wear and heat resistance of coatings was examined. The wear resistance is provided by borides Fe_2B and carboborides $(Fe, Cr)_2(B, C)$ and several times higher than the wear resistance of coatings from martensitic steel such as ASTM A420. The heat resistance of the coatings have the same level with the austenitic steels, such as Tempaloy A-1 ASME SA312 and TP 310 ASME SA312, and much higher than that of pearlitic and martensitic-ferritic steels, such as T11 ASME A213 and T122 ASME A213, due to the formation at higher temperatures complex oxides $(Fe, Al, Y)_2O_3$.

Технология дуговой металлизации (ДМ) позволяет наносить покрытия из металлических сплавов различных структурных классов, повышающие износостойкость и жаростойкость узлов промышленного оборудования [1], например, из порошковых проволок (ПП) системы легирования Fe-Cr-B [2]. При этом формирование структуры покрытий, нанесенных из ПП такого состава, и их поведение при абразивном изнашивании и газовой коррозии исследовано недостаточно.

Цель работы – изучить взаимосвязь фазового состава, микроструктуры, физико-механических и служебных свойств ДМ-покрытий из ПП-системы легирования Fe-Cr-B, дополнительно легированных углеродом, кремнием и алюминием.

Для исследования выбраны ПП диаметром 2,0 мм базовой системы легирования Fe-Cr-B с добавками углерода, кремния и алюминия. Расчетный химический состав покрытий из ПП приведен в табл. 1. Расчет произведен на основе модели, позволяющей описать процесс поступления кислорода в распыляемый металл при ДМ [3].

Подготовку поверхности образцов и напыление покрытий осуществляли в соответствии с ГОСТ 9.304. Напыление покрытий производили с помощью аппарата активированной дуговой металлизации (АДМ) на следующих режимах: ток дуги – 320 А, напряжение – 34 В, дистанция напыления – 95 мм, давление воздуха и пропана соответственно 0,42 и 0,41 МПа, скорость перемещения пистолета относительно напыляемой поверхности 0,1 м/с.

В отличие от типовой ДМ при АДМ в качестве транспортирующего газа применяется не сжатый воздух, а продукты сгорания пропано-воздушной смеси, что приводит к снижению парциального давления кислорода в сравнении с ДМ, благодаря чему в зоне горения дуги создается восстановительная атмосфера, препятствующая окислению металла [4].

Для исследования структуры, фазового состава и выполнения микрохимического анализа, а также определения износостойкости использовали образцы покрытий толщиной 1,5 мм, напыленные на призмы 10×10×50 мм из стали 20. Для определения жаростойкости использовали образцы покрытий толщиной 0,4 мм, напыленные на призмы 30×20×3 мм из стали 12Х1МФ.

Фазовый состав покрытий определяли на рентгеновском дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 в Cr-K_α излучении. Микрохимический состав покрытий изучали на сканирующем электронном микроскопе Philips SEM 535 с помощью приставки Genesis 2000.

Микротвердость по сечению металлизационных покрытий измеряли согласно ГОСТ 9450 на микротвердомере Leica VMHT AUTO при нагрузке 3 Н.

Адгезионную прочность покрытий исследовали по методике конического штифта [5] с помощью машины Instron 3382, результаты усредняли по трем образцам.

Износостойкость определяли для поверхности образцов покрытий с размерами 10×10 мм путем совершения возвратно-поступательных движений по шлифовальной бумаге на основе электрокорунда. Путь трения образца за одно испытание при скорости движения 0,158 м/с

устанавливался равным 60 м. Нормальная удельная нагрузка на образец устанавливалась равной 10 кг, удельная нагрузка – 1 МПа, величина поперечного смещения шлифовальной бумаги на один двойной ход образца – равной 0,0012 м. Показатель износостойкости покрытий, равный отношению изменений массы эталона и образца, определялся по результатам трех испытаний.

Жаростойкость образцов покрытий, определяли согласно ГОСТ 9.312 как величину, обратную увеличению массы в результате выдержки в течение 100 ч при температуре 700 °С.

Таблица 1

Расчетный химический состав покрытий из ПП

Марка ПП	Расчетный химический состав покрытий из ПП, мас. %						
	C	Cr	B	Al	Si	Y	Fe
1	0,6	13,0	5,0	2,0	1,0	1,0	Основа
2	0,2	11,0	5,0	2,0	4,5	1,0	Основа
3	0,2	11,0	5,0	5,5	1,0	1,0	Основа

Результаты определения фазового состава методом рентгеноструктурного анализа приведены на рис. 1. Основной фазой покрытия является твердый раствор на основе α -железа. В покрытиях распределены упрочняющие фазы боридов Fe_2B и карбоборидов $(\text{Fe,Cr})_2(\text{B,C})$.

Покрытия имеют высокую среднюю микротвердость по всему поперечному сечению – 10, 12,5 и 17 ГПа (табл. 2).

Адгезионная прочность покрытий из разработанных ПП превышает значения для покрытий из ПП аналогичного назначения (табл. 3).

По результатам определения износостойкости по закрепленному абразиву наибольшую потерю массы имеют покрытия из ПП марки 1, а наименьшую – покрытия из ПП марки 3, при этом износостойкость покрытий из ПП марки 3 в 3,57 раза выше износостойкости покрытий из мартенситной стали 20X13, рис. 2. Вероятно, износостойкость покрытий обеспечивается за счет упрочняющих фаз боридов Fe_2B и карбоборидов $(\text{Fe,Cr})_2(\text{B,C})$.

Удельное увеличение массы образцов покрытий марок 1–3 составило 0,65–0,54 г/(м²·ч), что существенно ниже аналогичных значений для перлитных сталей и мартенситно-ферритных сталей 12X1МФ ГОСТ 20072 и 1X12B2МФ ТУ14-ЗР-55. Более того, удельное увеличение массы образцов покрытий сопоставимо со значениями для аустенитных сталей 12X18Н12Т и 20X23Н18 ГОСТ 5632, широко используемых в котлостроении (табл. 4) [6]. Вероятно, жаростойкость покрытий обеспечивается за счет формирования на поверхности покрытий после высокотемпературной выдержки оксидов $(\text{Fe, Al, Y})_2\text{O}_3$, рис. 3.

Проведенные исследования показывают, что физико-механические и служебные свойства покрытий возрастают при наличии в шихте ПП-компонентов, содержащих алюминий, что, вероятно, связано с протеканием алюмотермических реакций [7], способствующих более равномерному плавлению борсодержащих компонентов ПП и формированию однородной структуры покрытий.

Таблица 2

Микротвердость покрытий

Марка ПП	Микротвердость HV0,3		
	Среднее	Максимальное	Минимальное
1	925±137	1117	636
2	904±144	1229	603
3	1111±64	1255	945

Таблица 3

Адгезионная прочность покрытий

Марка ПП	1	2	3	PMet 296 Polymet	EuTronic Arc 595 Castolin Eutectic	95MXC Praxair TAFA
Адгезионная прочность, МПа	44,8	51,5	58,2	41	40	40

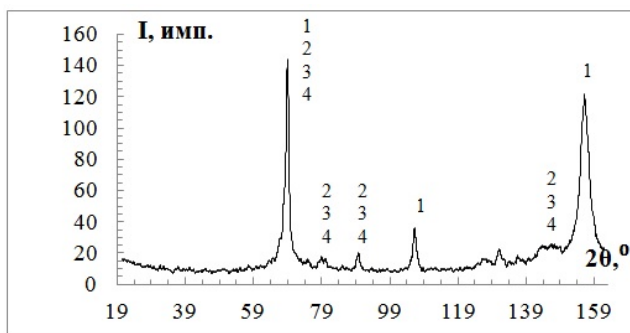


Рис. 1. Дифрактограммы поверхности покрытия из ПП 3, согласно табл. 2. Цифры рядом с пиками соответствуют фазам:
1 – α -Fe; 2 – Fe_2B ; 3 – $(\text{Fe,Cr})_2(\text{B,C})$; 4 – $(\text{Fe,Cr})_2$

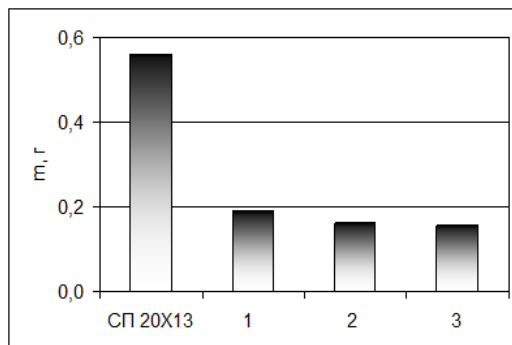
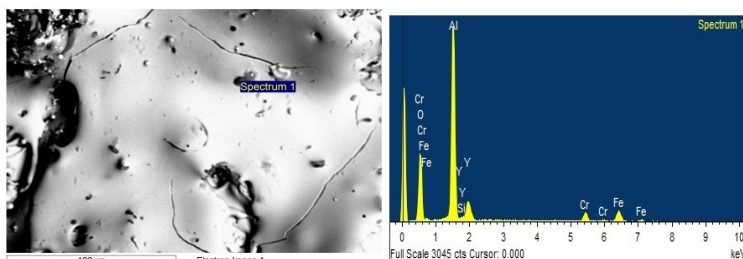


Рис. 2. Износостойкость покрытий

Таблица 4

Жаростойкость котельных сталей

Марка стали	Класс стали	Удельное изменение массы сталей, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$
12Х1МФ ГОСТ 20072	Перлитная	80
1Х12В2МФ ТУ14-ЗР-55	Мартенсито-ферритная	6
12Х18Н12Т ГОСТ 5632	Аустенитная	0,4
20Х23Н18 ГОСТ 5632		0,1



a

б

Element		O	Al	Si	Cr	Y	Fe	Total
Content	wt. %	38,21	37,41	0,34	4,61	11,11	8,32	100
	at. %	57,55	33,42	0,29	2,14	3,01	3,59	100

в

Рис. 3. Результаты сканирующей электронной микроскопии покрытия из ПП 3 согласно табл. 2: *a* – микроструктура; *б* – спектр; *в* – расшифровка спектра

Выводы

1. Показано, что микротвердость покрытий из порошковой проволоки системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y в среднем в 1,22, а износостойкость и жаростойкость в 1,15 и 1,20 раза выше, чем для покрытий из порошковой проволоки системы легирования Fe-C-B-Cr-Y, что связано с эффектом экзотермических реакций алюминия с железом и оксидами. Адгезионная прочность покрытий из порошковой проволоки базовой системы легирования Fe-Cr-B, в шихту которой дополнительно введен алюминий, более чем на треть превышает значения для покрытий из проволок аналогичного назначения.

2. Установлено, что износостойкость металлизационных покрытий в несколько раз превышает износостойкость покрытий из мартенситной стали 20Х13, а их жаростойкость – одного уровня с аустенитными сталями, такими как 1Х18Н12Т, и на порядок выше, чем у перлитных и мартенситно-ферритных сталей, таких как 12Х1МФ и 1Х12В2МФ. Показано, что износостойкость покрытий обеспечивается за счет упрочняющих фаз боридов Fe_2B и карбоборидов $(\text{Fe,Cr})_2(\text{B,C})$, а их жаростойкость – за счет формирования на поверхности, при высоких температурах, комплексных оксидов $(\text{Fe, Al, Y})_2\text{O}_3$.

3. Высокие показатели физико-механических и служебных свойств покрытий из разработанных порошковых проволок позволяют использовать их для повышения ресурса узлов оборудования тепловых электростанций, работающих в условиях износа и коррозии.

1. *Коробов Ю. С.* Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий // Сварочное производство. 2005. № 2. С. 47–50.

2. *Борисова А. Л., Миц И. В., Кайда Т. В., Дзыкович И. Я., Коржик В. Н.* Структура и свойства электродуговых покрытий на основе ферробора, полученных из порошковых проволок // Автоматическая сварка. 1991. № 9 (462). С. 66–68.

3. *Korobov Yu., Filippov M., Shallimov M., Nevezhin S.* Modeling a formation of Fe-Cr-Al coating produced by arc spraying // ITSC 2011. ASM International. 2011. P. 1463–1466.

4. *Коробов Ю. С., Бороненков В. Н.* Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. Екатеринбург, 2012. 268 с.

5. *Тушинский Л. И., Плохов А. В., Токарев А. О., Синдеев В. И.* Методы исследования материалов. М., 2004. 384 с.

6. *Никитин В. И.* Расчет жаростойкости металлов. М., 1976. 207 с.

7. *Похмурский В. И., Пух В. С., Студент М. М.* Основы формиро-

вания защитных и восстановительных покрытий электродуговым напылением из порошковых проволок // Физ.-хим. механика материалов. 1986. № 6. С. 11–16.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕЙ

О. И. Нохрина, И. Д. Рожихина, И. Е. Ходосов

Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк

Приведены результаты исследований процессов получения металлизированных продуктов путем твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд с применением в качестве восстановителей углей Кузбасского угольного бассейна. По результатам термодинамического моделирования определены оптимальные расходы углей, необходимые для получения металлизированных продуктов с заданным составом и степенью металлизации. Представлены результаты высокотемпературных экспериментов по изучению влияния свойств углей на процессы твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд. Приведены результаты математической обработки данных.

Presentation of the results of research processes of metallized products by solid-phase reduction of iron using coal as reducing the Kuzbass coal basin. Thermodynamic modeling to determine the optimal spending of coal for metallized products specified composition. The results of high-temperature experiments on the effect of coal properties on the process of the solid-state reduction of iron. The results of mathematical data processing.

Тенденцией последних лет является снижение качества металлолома, а именно увеличивается содержание цветных металлов и неметаллических материалов. При этом требования к металлопродукции непрерывно возрастают. Актуальной задачей является производство высококачественной металлургической продукции, обладающей высокими эксплуатационными характеристиками. Перспективным сырьем для производства высококачественных сталей является так называемое железо прямого восстановления, которое получают путем внедоменного передела железосодержащего сырья [1].

В России и в мире железо прямого восстановления в основном получают с использованием в качестве восстановителя конвертированного природного газа. Применение природного газа приводит к удорожанию стоимости железа. При этом до 8 % произведенного

в мире железа прямого восстановления осуществляется с использованием твердых углеродистых восстановителей [2].

Процессы твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд с использованием в качестве твердого углеродистого восстановителя углей не имеют однозначной оценки, что связано с многокомпонентностью системы и одновременным протеканием восстановительных реакций с участием твердого углерода и газообразных продуктов. Следует учитывать, что в процессах твердофазного восстановления одновременно развиваются реакции как прямого, так и косвенного восстановления железа из оксидов железных руд.

Актуальной является работа по исследованию и разработке энергоэффективной технологии комплексной переработки железосодержащего сырья и углей с целью получения металлизированных материалов, пригодных для использования при выплавке сталей ответственного назначения [3].

Исследования включали термодинамическое моделирование процессов твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд, проведение высокотемпературных экспериментов, изучение свойств используемых и полученных в результате металлизации материалов (с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» СибГИУ), а также математическую обработку полученных данных.

При проведении исследований в качестве железосодержащего сырья использовали железную руду и железорудный концентрат, полученный путем обогащения руды. Составы используемых железосодержащих материалов приведен в табл. 1, 2. В качестве твердых углеродистых восстановителей применяли коксовый орешек и угли Кузбасского угольного бассейна: уголь бурый марки Б2; уголь длиннопламенный марки Д; уголь слабоспекающийся марки СС; уголь тощий марки ТО. Выбранные марки углей отличаются своими характеристиками [4, 5]. Технический анализ и элементный состав используемых восстановителей приведен в табл. 3, 4 соответственно.

Исследование процесса твердофазного восстановления железа осуществлялось с использованием программного комплекса «Терра» методом расчета равновесия сложной термодинамической системы, основанным на принципе максимума энтропии [6].

Таблица 1

Фазовый состав исходной железной руды

Много	гематит (Fe_2O_3)
Присутствует	магнетит ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), гетит ($\alpha\text{-FeOOH}$), кварц (SiO_2), каоленит ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$)
Немного	хлорид железа, полевоый шпат

Таблица 2

Химический состав железосодержащих материалов

Химический состав железной руды, % масс.							
Fe _{общ}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	MgO	S	влага
52,3	19,15	3,31	0,072	0,94	0,76	0,42	5,78
Химический состав железорудного концентрата, % масс.							
61,2	7,92	2,41	0,02	1,96	2,31	0,41	6,27

Таблица 3

Технический анализ восстановителей

Восстановитель	Характеристика			
	Содержание [C] в рабочей массе, %	A ^d (зола), %	V ^{daf} (летучие), %	W ^r (влага), %
Уголь – Б2	49,1	7,83	46,7	24,7
Уголь – Д	55,6	5,64	43,5	10,4
Уголь – СС	70,2	6,41	24,3	6,7
Уголь – ТО	76,3	8,34	15,2	5,1
Кокс	84,4	12,3	1,3	1,2

Таблица 4

Элементный состав восстановителей

Восстановитель	Элементный анализ на горючую массу, %				
	C ^{daf}	H ^{daf}	N ^{daf}	O ^{daf}	S ^{daf}
Уголь – 2Б	70,41	3,88	0,98	22,58	1,15
Уголь – Д	72,02	6,12	1,74	20,12	0,34
Уголь – СС	85,30	4,78	2,16	6,52	0,14
Уголь – ТО	90,79	3,96	2,93	2,16	0,31
Кокс	96,97	0,56	1,42	0,56	0,51

Термодинамическое моделирование процессов твердофазного восстановления железа из оксидов руды с применением углей разных технологических марок проводили с учетом элементного, оксидного составов углей и составов газов, образующихся при нагреве угля. Термодинамическая система представлена элементами: Н-О-S-N-C-Si-Al-Fe-Ti-Mg-Ca-Na-K. Из веществ, которые могут быть получены в результате расчетов равновесного состояния, были выбраны значимые, из которых в газовой фазе могут присутствовать H₂; H₂O; H₂S; CO; CO₂; CH₄; N₂; в конденсированной – C; Fe; FeO; FeS; Fe₃C;

SiO_2 ; Al_2O_3 ; TiO_2 ; MgSiO_3 ; $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$; CaCO_3 ; CaSiO_3 ; CaTiO_3 ; $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$; $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$.

Результаты моделирования процессов твердофазного восстановления железа с использованием в качестве восстановителя угля позволили определить зависимости степени восстановления железа и состава газовой фазы от расхода угля каждой технологической марки. На рис. 1, а представлены зависимости состава и объема газовой фазы, образующейся в результате выделения летучих компонентов при нагреве длиннопламенного угля. Зависимость степени восстановления и состава газовой фазы от расхода длиннопламенного угля при восстановлении 100 кг руды представлены на рис. 1, б.

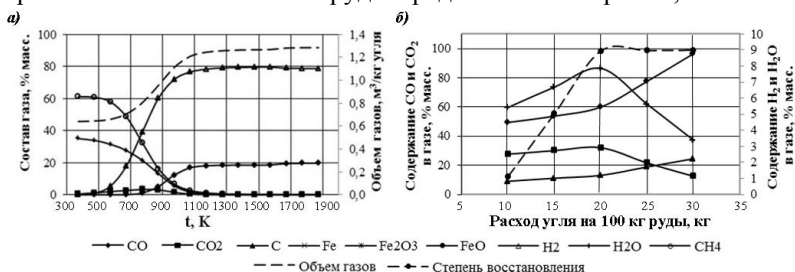


Рис. 1. Термодинамическое моделирование процессов твердофазного восстановления оксидов железа длиннопламенным углем:
 а – зависимость состава и объема газовой фазы от температуры;
 б – зависимость степени восстановления и состава газовой фазы от расхода длиннопламенного угля при восстановлении 100 кг руды

Исследования процессов получения металлизированных материалов проводили путем высокотемпературных экспериментов. Для проведения экспериментов были изготовлены рудо-угольные композиции. Смеси составляли с использованием разных расходных коэффициентов материалов, в том числе со значениями, полученными в ходе термодинамического моделирования. Предварительно компоненты подвергали дроблению и последующему отсеvu нужных фракций, после чего в заданных соотношениях руды и угля композиции усреднялись и подвергались брикетированию. Брикеты массой 30 гр. каждый помещали в графитовый тигель и закрывали крышкой. Тигель с брикетами вводили в горячую зону печи сопротивления нагретой до температур эксперимента и оставляли на время изотермической выдержки. Для проведения экспериментов была выбрана температура изотермической выдержки 1173 K при времени выдержки 90 мин.

В полученных в результате экспериментов металлизированных материалах методами химического анализа определяли содержание $Fe_{\text{общ}}$, $Fe_{\text{мет}}$, с помощью электронных весов фиксировали потерю массы брикетов. Расчетным путем определяли степень восстановления – α и степень металлизации – $\varphi_{\text{мет}}$, согласно формулам (1) и (3) соответственно:

$$\alpha = \frac{m_o}{\sum m_{Fe_2O_3}} \cdot 100, \quad (1)$$

где m_o – масса кислорода, удаленного из образца, рассчитываемая по формуле

$$m_o = (\Delta m - m_{\text{лет}}) \cdot \frac{M_o}{M_{CO}}, \quad (2)$$

где α – степень восстановления, %;

Δm – убыль массы брикета, %;

$m_{\text{лет}}$ – поправка на выделение гидратной влаги и летучих соединений, содержащихся в восстановителе, %;

M_o – молярная масса кислорода, г/моль;

M_{CO} – молярная масса оксида углерода, г/моль;

$$\varphi_{\text{мет}} = Fe_{\text{мет}} / Fe_{\text{общ}} \times 100, \quad (3)$$

где $\varphi_{\text{мет}}$ – степень металлизации, %;

$Fe_{\text{мет}}$ – содержание железа металлического, %;

$Fe_{\text{общ}}$ – содержание железа общего (сумма окисленного и металлического железа), %.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

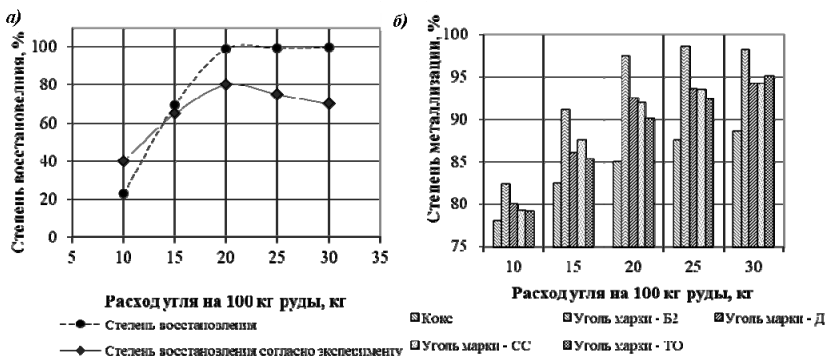


Рис. 2. Результаты лабораторных экспериментов:

а – расчетная и экспериментальная степени восстановления брикетов при различном расходе длиннопламенного угля;

б – степень металлизации при разном количестве восстановителей

Наиболее высокая степень восстановления (рис. 2, *a*) была получена при металлизации рудо-угольных брикетов, в которых количество восстановителя соответствовало значению, полученному в результате термодинамического моделирования, что подтверждает адекватность полученной термодинамической модели. По результатам экспериментов определено, что увеличение количества восстановителя приводит к увеличению степени металлизации при использовании разных восстановителей (рис. 2, *б*). При этом наибольшая степень металлизации характерна для рудо-угольных брикетов, составленных с бурым углем. Разное значение степени металлизации брикетов, вероятно, связано с проявлением различных свойств используемых восстановителей [7].

Исследования включали определение кинетики протекания процессов твердофазного восстановления железа из оксидов железной руды. Эксперименты проводили с применением метода периодического взвешивания в печи сопротивления при температурах 1273, 1373, 1473 К и продолжительности изотермической выдержки 90 мин. [8]. Расчет степени восстановления осуществляли согласно формулы (1). Результаты экспериментов в виде кинетических кривых представлены на рис. 3.

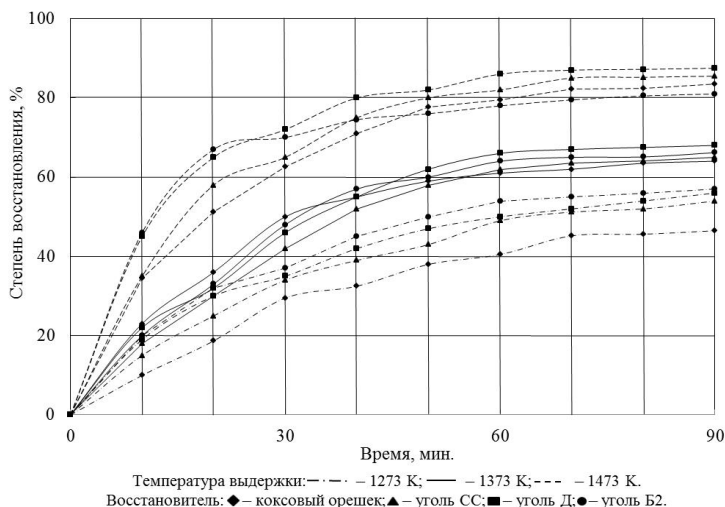


Рис. 3. Зависимость степени восстановления от времени изотермической выдержки

Из приведенных зависимостей следует, что через 60 мин. изотермической выдержки при температуре 1473 К имеет место наибольшая

шая степень восстановления у брикетов, составленных с использованием в качестве восстановителя длиннопламенного угля. Химический анализ показал, что полученный материал содержит $Fe_{мет}$ 83 % при $\phi_{мет}$ 96 %. В результате изотермической выдержки при температуре 1373 К наибольшая степень восстановления у брикетов, составленных с использованием в качестве восстановителя бурого угля. Полученный материал содержит $Fe_{мет}$ 67 % при $\phi_{мет}$ 97 %. В результате изотермической выдержки при 1273 К наибольшая степень восстановления наблюдается у брикетов, составленных с использованием в качестве восстановителя бурого угля. Полученный материал содержит $Fe_{мет}$ 50 % при $\phi_{мет}$ 97 %.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о различном влиянии физико-химических свойств углей на процессы металлизации при разных температурах изотермической выдержки.

Математическую обработку данных осуществляли с использованием метода математического планирования экспериментов [9]. На основании экспериментальных данных были получены уравнения регрессии (1, 2, 3, 4). В качестве функции отклика использовали значение степени металлизации – $\phi_{мет}$. В качестве влияющих факторов применяли следующие характеристики восстановителей: x_1 – содержание золы (A^d); x_2 – содержание летучих (V^{daf}); x_3 – содержание влаги (W^r). Значение R^2 для представленных уравнений находится в пределах 85 – 95 %.

$$y(1173) = 84,95 + 0 \cdot x_1 + 0,039 \cdot x_2 + 0,251 \cdot x_3; \quad (1)$$

$$y(1273) = 88,48 + 0 \cdot x_1 + 0,330 \cdot x_2 - 0,326 \cdot x_3; \quad (2)$$

$$y(1373) = 90,78 + 0 \cdot x_1 + 0,027 \cdot x_2 + 0,195 \cdot x_3; \quad (3)$$

$$y(1473) = 97,00 - 0,152 \cdot x_1 + 0,036 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3. \quad (4)$$

Анализ уравнений регрессии показал, что значение фактора x_1 (A^d) проявляется с отрицательным знаком при температуре 1473 К, что показывает обратную зависимость степени металлизации от содержания золы в восстановителе. Наиболее весомым фактором является содержание летучих x_2 (V^{daf}), согласно полученным уравнениям увеличение содержания летучих в восстановителе приводит к увеличению степени металлизации при разных температурах восстановительного обжига. Значение фактора x_3 (W^r) проявляется по-разному, так при температуре экспериментов 1273 К значение отрицательно, а при 1473 К равно нулю.

Выводы

В результате исследований процессов получения металлизированных материалов с использованием углей Кузбасского угольного бас-

сейна создана термодинамическая модель, применение которой позволяет определить оптимальные расходы углей разных технологических марок при получении металлизованных продуктов с заданным составом и степенью металлизации. В ходе проведенных исследований получены сведения о влиянии физико-химических свойств разных марок углей на протекание процессов металлизации. Полученные данные могут быть использованы при разработке технологии совместной переработки железосодержащего сырья и углей с целью получения высококачественных металлизованных материалов.

1. *Паришин В. М., Жихарев П. Ю.* Сталеплавильное производство : резервы, развитие и повышение эффективности // Сб. тр. XIII междунар. конгресса сталеплавильщиков. Москва ; Полевской, 2014. 485 с.
2. *Юсфин Ю. С., Паииков Н. Ф.* Металлургия железа. М., 2007. 464 с.
3. *Ходосов И. Е., Нохрина О. И.* Получение чистого железа путем внедоменной переработки железных руд и углей Кузбасса // Кузбасс : образование, наука, инновации : материалы Инновационного конвента. Новокузнецк, 2014. С. 378–380.
4. *Мизин В. Г., Серов Г. В.* Углеродистые восстановители для ферросплавов. М., 1976. 272 с.
5. *Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А., Петров А. И.* Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна : справочник. М., 1994. 447 с.
6. *Рыбенко И. А.* Разработка методики и системы расчета вариантов технологий непрерывного получения металла в агрегатах струйно-эмульсионного типа : дис. ... канд. техн. наук. Новокузнецк, 2000. 165 с.
7. *Амдур А. М., Потапов А. М., Разницина А. Л., Лхамсуре М.* Кинетика восстановления железорудного концентрата углем // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 8. С. 17–20.
8. *Рожихина И. Д., Романенко Ю. Е., Лазаревский П. П., Ходосов И. Е.* Альтернативные углеродосодержащие материалы в восстановительных процессах получения марганцевых, хромистых сплавов и металлизованного железа // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : сб. тр. XVIII Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Е. В. Протопопова. Новокузнецк, 2014. С. 128–134.
9. *Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., 1976. 278 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ РЕЗКИ СИСТЕМЫ «МЕДЬ-КАРБОСИЛИЦИД ТИТАНА»

С. А. Оглезнева, Н. Д. Оглезнев, В. Г. Гилев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь

Исследовано влияние содержания карбосилицида титана Ti_3SiC_2 на пористость, твердость, прочность, электросопротивление, эрозионную износостойкость электродов-инструментов из композиционных материалов на основе меди.

Рассмотрены требования к электродам-инструментам для электроэрозионной прошивки. Выявлены основные функции тугоплавкой фазы, способствующие повышению эрозионной стойкости электрода – невысокое электросопротивление и капиллярные свойства как, например, у карбосилицида титана. Композиционные материалы на основе меди с различным содержанием карбосилицида титана изготовлены методом порошковой металлургии. Методами рентгенофазового, электронномикроскопического, энергодисперсионного и других методов анализа изучено фазообразование в системе «медь – карбосилицид титана» при спекании и обнаружено, что в зернах карбосилицида титана происходит деинтеркалирование кремния и диффузия меди до 20 %, а часть зерен превращается в силицид титана Ti_5Si_3 и незначительные количества TiC , SiC , $TiSi_2$, что приводит к повышению электросопротивления композиционного материала.

Установлено, что с увеличением содержания карбосилицида титана и его разложения при спекании увеличиваются электросопротивление и пористость композиционных материалов. Определено, что относительная износостойкость при электроэрозионной прошивке электрода-инструмента из композиционных материалов на основе меди, содержащих карбосилицид титана, была выше в 5 раз, чем у чистой меди.

The influence of the content Ti_3SiC_2 on porosity, hardness, strength, electrical resistance, erosion wear of tool-electrode made of composite materials based on copper. The requirements to the too- electrode for EDM are reviewed. The basic function of a refractory phase that improve the erosion resistance of the electrode are founded – they are the low electrical resistance and wicking properties, such as, for example, Ti_3SiC_2 . Composite materials based on copper with different content Ti_3SiC_2 made by powder

metallurgy. It has been investigated the formation of phases in the "copper- Ti_3SiC_2 " during sintering by X-ray diffraction, the electron microscope, energy dispersive and other methods of analysis, and found deintercalation of Si from the grains of Ti_3SiC_2 and diffusion of copper up to 20% into Ti_3SiC_2 , and a part of grains is converted into titanium silicide Ti_5Si_3 and minor amount of TiC, SiC, $TiSi_2$, which leads to increased electrical resistance of the composite material. It was found that with increasing Ti_3SiC_2 and its expansion during sintering increases the resistivity and porosity of the composite materials. It was determined that the relative wear resistance in EDM electrode-tool made of composite materials based on copper with Ti_3SiC_2 was 5 times higher than that of pure copper.

Введение

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на эффекте расплавления и испарения микропорций материала в основном под тепловым воздействием импульсов электрической энергии. Эта энергия выделяется в канале разряда между поверхностью обрабатываемой детали и электродом-инструментом, погруженным в жидкую (обычную неэлектропроводящую) среду. Следующие друг за другом импульсные разряды производят выплавление и испарение микропорции материала; частицы расплавленного материала выбрасываются из зоны обработки развивающимся в канале разряда давлением и электрод-инструмент получает возможность внедряться в обрабатываемую деталь. Электроды-инструменты (ЭИ) являются одними из основных элементов, участвующих в электроэрозионном процессе. Параметры их оказывают существенное влияние на стабильность электроэрозионного процесса, его эффективность и область использования. Производительность и качество ЭЭО также находятся в зависимости от материала ЭИ. Электрод-инструмент должен изготавливаться из эрозионностойкого материала, обеспечивать стабильную работу во всем диапазоне рабочих режимов ЭЭО и максимальную производительность, имея малый износ. Разработка новых технологических процессов создания эрозионностойких материалов, обладающих низкой стоимостью и высокой износостойкостью, представляет собой весьма важную задачу и имеет большое экономическое значение, так как эрозионный износ электродов-инструментов может быть в 10–100 раз выше, чем объем снятого с детали металла, что значительно снижает эффективность или делает даже нецелесообразным применение метода электроэрозионной обработки.

Наиболее предпочтительными для удовлетворения требований к ЭИ являются композиционные материалы типа псевдосплавов. При переходе в такой гетерогенной структуре одной из фаз в жидкое состояние она

силами поверхностного натяжения удерживается в порах тугоплавкой фазы, образующей капилляры. В настоящее время разработаны композиционные материалы на основе меди с дисперсными добавками окислов, боридов, нитридов и бора, позволяющие улучшить эксплуатационные свойства электрода-инструмента [1]. При увеличении доли тугоплавкой составляющей повышается твердость и эрозионная стойкость электрода, но ухудшается электро- и теплопроводность, поэтому оптимизация состава материала может быть связана с повышением электропроводности тугоплавкой фазы. Перспективной тугоплавкой добавкой может быть карбосилицид титана Ti_3SiC_2 со слоистой структурой, удельное сопротивление которого значительно ниже и не зависит от температуры, как у большинства карбидов [2].

Цель работы – изучение формирования структуры в композиционном порошковом материале «медь – карбосилицид титана» и исследование эрозионной износостойкости электрода-инструмента из этого материала при электроэрозионной прошивке металлических сплавов.

Методика эксперимента

Для изготовления электродов из композиционных материалов использованы порошки электролитической меди ПМС-1 (ГОСТ 49-60-75) и карбосилицида титана, полученного методом реакционного спекания. Порошки смешивали в течение 4 часов. Из смесей прессовали образцы при давлении 600 МПа, затем образцы отжигали в вакуумной печи при температуре 700 °С и проводили повторное прессование при 600 МПа. Прессовки окончательно спекали в вакуумной печи при температуре 1070±10 °С, 2 ч.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 в $Cu\ K\alpha$ -излучении. Идентификация фазового состава была выполнена по картотеке Международного центра дифрактометрических измерений. Электронно-микроскопические исследования проводили на растровом электронном микроскопе Tescan Vega3 Sem. Плотность композиционных материалов определяли по стандартной методике (ГОСТ 18898-89). Электросопротивление измеряли на цифровом программируемом миллиомметре GOM-802 на образцах размерами 6×6×50 мм.

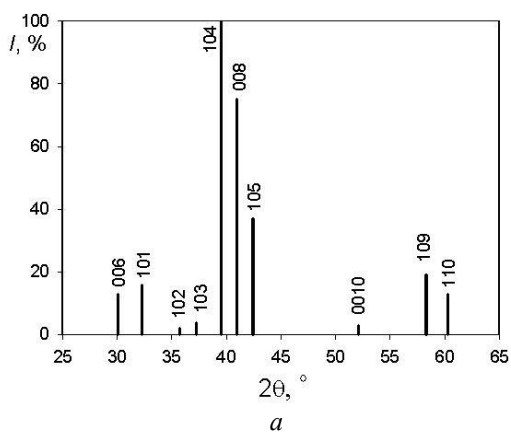
Испытания эксплуатационных свойств электродов проводили при электроэрозионной прошивке листа стали X12Ф толщиной 5,5 мм с твердостью 58 HRC на станке Electronica Smart CNC на черновых режимах обработки E81 (длительность импульса 100 мкс, пауза 32 мкс, сила тока 15А) и E93 (длительность импульса 150 мкс, пауза 32 мкс,

сила тока 20А). В качестве рабочей жидкости использовалось масло EDM Oil – IPOL SEO 450.

Относительный износ электрода определяли по отношению глубины прошитога в стали отверстия к линейному износу электрода [3].

Результаты и обсуждение

На дифрактограмме порошка карбосилицида титана (рис. 1, *a*), обнаружены рефлексы отражений практически от всех идентифицированных плоскостей [4] (табл. 1). На дифрактограмме композиционного материала, кроме меди, присутствуют рефлексы фаз, идентифицированных по [5, 4, 6] как Ti_3SiC_2 , Ti_5Si_3 , TiC , SiC , $TiSi_2$ (рис. 1, *б*), (табл. 2), что свидетельствует о частичном разложении карбосилицида и согласуется с данными [7].



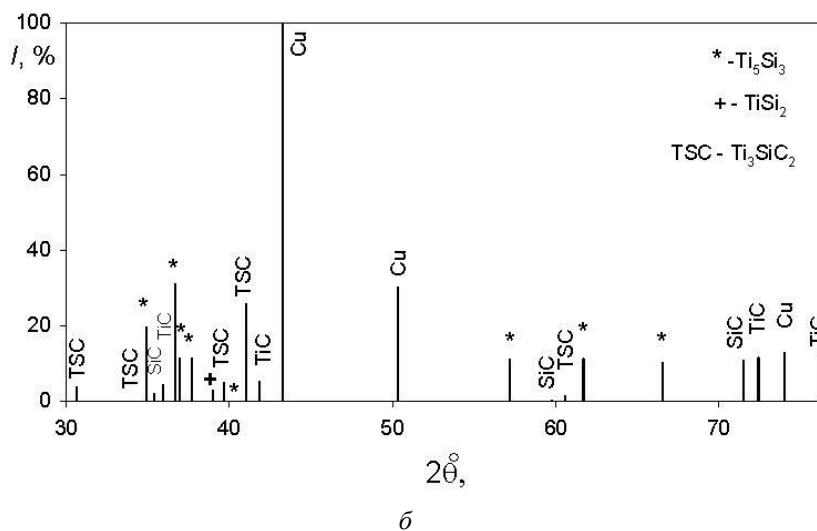


Рис. 1. Штрих-дифрактограммы Ti_3SiC_2 (а) и спеченного порошкового материала «медь – 37,5 об. % Ti_3SiC_2 » (б)

Таблица 1

Межплоскостные расстояния порошка Ti_3SiC_2

Угол 2θ , °	Межплоскостные расстояния, нм	Интенсивность, %	Фаза (hkl)
30,080	0,2975	13	Ti_3SiC_2 (006)
32,257	0,2779	16	Ti_3SiC_2 (101)
35,693	0,2519	2	Ti_3SiC_2 (102)
37,206	0,242	4	Ti_3SiC_2 (103)
39,49	0,22845	100	Ti_3SiC_2 (104)
40,91	0,22093	75	Ti_3SiC_2 (008)
42,42	0,21337	37	Ti_3SiC_2 (105)
52,097	0,17581	3	Ti_3SiC_2 (0010)
58,292	0,15851	19	Ti_3SiC_2 (109)
60,301	0,15367	13	Ti_3SiC_2 (110)

Таблица 2

**Межплоскостные расстояния спеченного порошкового материала
«медь – 37,5 об. % Ti_3SiC_2 »**

Межплоскостные расстояния, нм	Интенсивность, %	Фаза (<i>hkl</i>)	Межплоскостные расстояния, нм	Интенсивность, %	Фаза (<i>hkl</i>)
0,2917	4	Ti_3SiC_2 (006)	0,20878	100	Cu (111)
0,26441	0,21	Ti_3SiC_2 (101)	0,18105	30,14	Cu (200)
0,25674	0,25	Ti_5Si_3 (002)	0,16096	0,24	Ti_5Si_3 (400)
0,25672	19,72		0,16096	11,34	
0,2521	2	SiC	0,15448	0,46	SiC
0,24937	4,5	TiC	0,15270	1,46	Ti_3SiC_2 (110)
0,24482	31,07	Ti_5Si_3 (210)	0,15016	11,07	Ti_5Si_3 (222)
0,24425	0,4		0,15013	0,19	
0,24285	11,52	Ti_5Si_3 (102)	0,14030	10,44	Ti_5Si_3 (213)
0,23828	0,31		0,13181	0,186	SiC
0,23823	11,56		0,13174	11,04	
0,23052	2,98	TiSi_2 (311)	0,13035	0,37	TiC
0,22688	5,18	Ti_3SiC_2 (104)	0,13034	11,63	
0,21973	1,21	Ti_5Si_3 (211)	0,12790	12,94	Cu (220)
0,21964	25,97	Ti_3SiC_2 (008)	0,12478	12,19	TiC
0,21571	5,46	TiC	0,12473	0,27	

Межплоскостные расстояния в карбосилициде титана уменьшились. Так как карбосилицид имеет слоистое строение с расположением плоскостей Si между плоскостями TiC, то, учитывая слабую связь кремния с титаном, вероятно деинтеркалирование Si из слоев решетки карбосилицида [6, 8]. Твердых растворов кремния в меди не обнаружено, так как межплоскостные расстояния меди не увеличены и микротвердость медной матрицы повышена незначительно. Энергодисперсионный ана-

лиз показал, что после твердофазного спекания системы «медь – карбосилицид титана» взаимодействие с медью приводит к превращению части зерен карбосилицида титана в карбид титана, карбид кремния, силицид титана $TiSi_2$ и твердый раствор углерода на базе силицида титана $Ti_5Si_3(C)$, имеющий неравномерную окраску по зерну (рис. 2). В зернах карбосилицида титана содержание кремния ниже стехиометрического примерно на 14 % ввиду деинтеркаляции кремния (табл. 3).

Особенностями формирования структуры материала «медь-карбосилицид титана» при спекании является, во-первых, образование силицида Ti_5Si_3 наряду с $TiSi_2$.

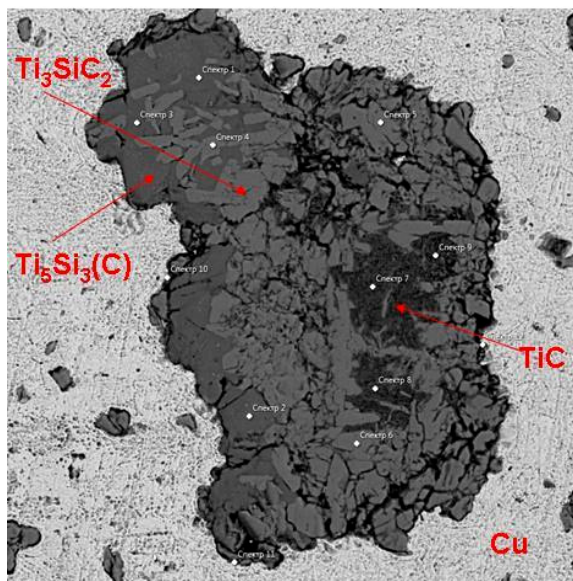


Рис. 2. Микроструктура материала «медь – карбосилицид титана»

Таблица 3

Элементный состав спеченного материала
«медь – карбосилицид титана»

№ спектра	Si	Ti	Cu	Фаза
1	25,84	70,77	2,66	$Ti_5Si_3(C)$
2	25,45	70,34	3,53	$Ti_5Si_3(C)$

№ спектра	Si	Ti	Cu	Фаза
3	25,51	71,53	2,23	Ti ₅ Si ₃ (C)
4	8,88	68,79	22,33	Ti ₃ SiC ₂ + Cu
5	8,79	68,83	22,38	Ti ₃ SiC ₂ + Cu
6	8,45	69,05	22,50	Ti ₃ SiC ₂ + Cu
7	0,41	92,82	6,14	TiC
8	0,78	90,11	8,62	TiC
9	2,66	86,46	10,64	TiC
10	6,63	68,51	24,12	TiC
11	6,19	20,87	68,45	Cu
12	4,11	26,45	64,79	Cu

Во-вторых, рефлексы отражений от большинства плоскостей Ti₅Si₃ раздвоены и межплоскостные расстояния немного отличаются от табличных, что, скорее всего, связано с образованием твердых растворов внедрения углерода Ti₅Si₃(C), что уже фиксировали в [9] при спекании данного карбосилицида.

Меди в зернах силицида содержится не более 2 %, что согласуется с данными о том, что силицид не взаимодействует с медью (растворимость не более 3 %) [10]. Карты распределения элементов показали, что медь (до 20 %) в композиционном материале занимает дисперсные поры (диаметром меньше 1 мкм) в ламелеобразных зернах карбосилицида титана (рис. 3).

При увеличении концентрации карбосилицида титана в меди пористость повышалась незначительно, так как между медью и карбосилицидом титана имеется физико-химическое взаимодействие, благоприятное для спекания; прочность при изгибе и твердость значительно увеличились. Электросопротивление композиционного материала увеличивалось при повышении концентрации карбосилицида титана, так как при спекании примерно половина карбосилицида превратилась в неэлектропроводный силицид титана (табл. 4). Износ электродов «медь – карбосилицид титана» при электроэрозионной прошивке на обоих испытанных режимах был меньше, чем у чистой меди (табл. 4). Хорошие эксплуатационные свойства обусловлены низкой пористостью, структурой, образующей наноразмерные капилляры для удержания расплава меди,

и постоянством электросопротивления карбосилицида титана в диапазоне температур при электроэрозионной обработке.

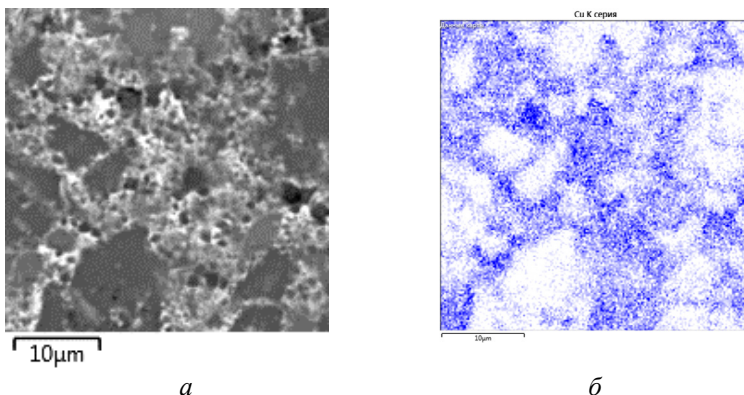


Рис. 3. Микроструктура карбосилицида титана, спеченного с медью (*a*) и карта распределения меди на участке микроструктуры (*б*)

Таблица 4

**Свойства порошкового спеченного материала
«медь – карбосилицид титана»**

Концентрация карбосилицида титана, об. %	Пористость, %	Твердость, HB, МПа	$\sigma_{изг}$, МПа	Удельное электросопротивление, Ом×м	Относительный эрозионный износ, %	
					Режим E81	Режим E93
0	0	400	500	0,021	5,6	6,9
12,5	2	650	280	0,06	3,2	5,2
25,0	6	770	300	0,010	-	-
37,5	7	800	340	0,014	1,0	4,0

Выводы

При спекании композиционного материала «медь – карбосилицид титана» происходит частичное превращение карбосилицида в твердый раствор $Ti_5Si_3(C)$ и небольшие количества карбида титана, карбида кремния, силицида титана $TiSi_2$, а содержание меди в зернах карбосилицида достигает 20 %.

Карбосилицид титана, впервые примененный для изготовления электрода-инструмента для электроэрозионной прошивки, показал перспективные свойства. При повышении концентрации в меди карбосилицида титана пористость композиционного материала повышается незначительно, а твердость и прочность возрастают. Относительная эрозионная стойкость электродов из композиционных порошковых материалов «медь – карбосилицид титана» при прошивке инструментальной стали на черновом режиме в 5–6 раз ниже, чем у электрода из чистой меди.

-
1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / под ред. В. П. Смоленцева. Т. 1. М., 1983. 247 с.
 2. Nickl J. J., Schweitzer K. K., Luxenberg P. Gasphasenabscheidung im Systeme Ti-C-Si // Les J. Common Metals. 1972. Vol. 26. P. 382.
 3. Фомеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки. М., 1980. 184 с.
 4. Картотека Международного центра дифрактометрических измерений (International Center for Diffraction Data) – PDF-2 (The Powder Diffraction Files, 2001 года, № лицензии 81200030).
 5. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М., 1961. 863 с.
 6. Kero Ida. Ti_3SiC_2 . Synthesis by Powder Metallurgical Methods // LICENTATE THESIS. 2007. May. Nr 34. 74 p.
 7. Yanchun Zhou, and Wanli Gu. Chemical reaction and stability of Ti_3SiC_2 in Cu during high-temperature processing of Cu/ Ti_3SiC_2 composites. Zeitschrift für Metallkunde. 2004. Vol. 95, Nr. 1. Pp. 50–56.
 8. Tungwai L. Ngai, Wei Zheng, Yuanyuan Li Effect of sintering temperature on the preparation of Cu– Ti_3SiC_2 metal matrix composite // Progress in Natural Science: Materials International. 2013. Vol. 23(1). P. 70–76.
 9. Надуткин А. В. Изучение процессов синтеза Ti_3SiC_2 и формирования конструкционной керамики на его основе : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2007. 16 с.
 10. Двойные и многокомпонентные системы меди / под ред. С. В. Шухардина. М., 1979. 248 с.

КАПИЛЛЯРНЫЕ СИЛЫ В ПРОЦЕССАХ ПОДГОТОВКИ СТЕКОЛЬНОЙ ШИХТЫ

О. Л. Парамонова

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Качество стекла во многом зависит от технологии подготовки шихты. Увлажнение стекольной шихты позволяет значительно снизить удаление частиц пыли и предотвратить разделение шихты во время транспортировки. Основными факторами, которые препятствуют сегрегации, являются капиллярные силы, возникающие между твердыми частицами шихты через слои водных растворов поташа, соды и селитры.

Glass quality is largely dependent on the batch preparation technology. Wetting of glass batch can significantly reduce the removal of dust particles and prevent batch separation during the transportation. The main factors that prevent segregation are capillary forces arising between the solid particles of charge through layers of water solutions of potash, soda, and nitrate.

Самоорганизация структуры дисперсных сыпучих материалов играет важную роль в процессах подготовки силикатного, в частности, стекольного сырья. В смесителях создаются условия для перехода от первоначально неравноценного порционного распределения порошкообразных сырьевых материалов к их достаточно усредненному расположению. Непрерывная относительная переориентация частиц, их подвижность в условиях механического перемешивания создают условия для проявления адгезионных способностей парных контактов. Однако для сухой шихты силы молекулярного притяжения твердых частиц настолько малы, что они не вызывают агрегацию компонентов. Сухие контакты не могут привести к фиксации прикоснувшихся частиц. Непрерывно соприкасающиеся частицы сухой шихты лишь после увлажнения начинают собираться в конгломераты. Смеситель с малым динамическим воздействием позволяет фиксировать и сохранять капиллярно образованные контакты. Разрушить такие жидкостные мостики способны лишь сильные перегрузки.

Для предотвращения сегрегации частиц подготовленной однородной шихты необходимы условия, при которых будут создаваться группировки сильно притягивающихся зерен. В случае частиц одинаковой формы капиллярная жидкость, равномерно распределяясь, не будет создавать подобной неоднородности. Лишь в случае нехватки капилляр-

ной жидкости возможно формирование отдельных капиллярно-упрочненных областей, окруженных сухими частицами.

Для формирования структуры частиц, не способных к сегрегации, необходимо создавать неравноценные капиллярные контакты частиц.

Подобная задача может решаться за счет использования:

- а) частиц разных размеров, но одинаковой формы;
- б) частиц одинакового размера, но различной формы;
- в) разного смачивания частиц.

Так, для частиц одной формы и разных размеров вводится понятие зародышеобразователей. Ими являются частицы, чья масса превышает капиллярную силу сцепления с подобными частицами. Следовательно, частицы такой фракции сами по себе не создают капиллярно-упрочненной системы. Однако такие крупные зерна будут привлекать более мелкие частицы, для которых большая частица играет роль зародышеобразователя.

Для частиц одного размера и различной формы в качестве зародышеобразователей будут выступать граненные зерна. Это обусловлено значительной капиллярной силой притяжения частиц в системе «шар – плоскость». Для небольшого количества капиллярной жидкости капиллярная сила может быть оценена с помощью выражения $f_{\text{кап}} = 4\sigma\pi R$, в то время как для контакта двух шаров эта сила не превышает значение $2\sigma\pi R$, где R – радиус шарообразной частицы, σ – поверхностное натяжение манжеты.

Как следствие, одним из приемов борьбы с сегрегацией можно считать введение в шихту из шарообразных частиц 5–10 % граненых частиц, обладающих повышенной способностью консолидировать окружающие зерна в присутствии капиллярной влаги. Просто показать, что одна кубическая частица собирает вокруг себя до 26 шарообразных частиц. Этот конгломерат снижает подвижность и способствует закреплению исходной структуры частиц (рис. 1).

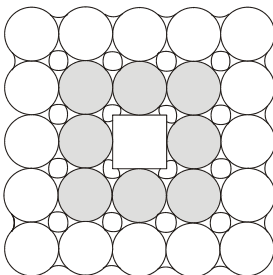


Рис. 1. Схема формирования капиллярно-упрочненной области около граненой частицы

На рис. 2 показана схема уплотнения частиц стекольной шихты после увлажнения. Область капиллярно-закрепленных частиц окружена сухими контактами.

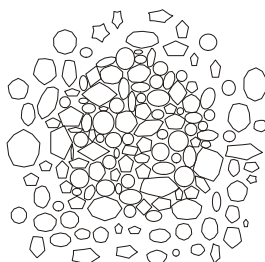


Рис. 2. Схема капиллярно-уплотненной группы частиц

Слабым звеном является нижняя граница конгломерата, так как здесь возможен отрыв отдельных частиц под действием силы тяжести. Этому отрыву противодействует капиллярная сила. Рассмотрим возможность отрыва частиц как в статическом, так и динамическом состоянии. Будем считать верхнюю частицу закрепленной в области капиллярно-уплотненной группы. Дальнейший анализ относится к нижней частице, отрыв которой и обуславливает сегрегацию шихты.

Проведем анализ возможности сегрегации с учетом сил капиллярного взаимодействия частиц и их силы тяжести [1].

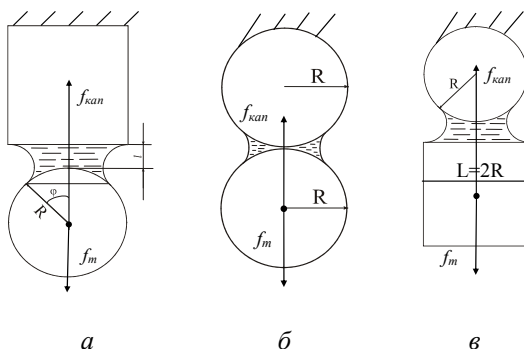


Рис. 3. Схемы капиллярного контакта:
а – куб – шар; б – шар – шар; в – шар – куб

Исследуем влияние гравитационного поля на суммарную силу сцепления, когда сила тяжести f_T и капиллярное усилие $f_{\text{кап}}$ направлены

в противоположные стороны для трех типов контактов: а) кубическая частица – шарообразная частица (рис. 3, а), шар – шар (рис. 3, б) и шар – кубическая частица (рис. 3, в).

Для контакта «закрепленная кубическая частица – шарообразная частица» и контакта из двух шарообразных частиц выражение для силы сцепления примет вид

$$\Delta f = k \cdot \sigma \cdot \pi \cdot R \cdot (\cos \Theta_1 + \cos \Theta_2) - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot g \cdot d \cdot R^3, \quad (1)$$

для контакта «закрепленная шарообразная частица – кубическая частица»

$$\Delta f = k \cdot \sigma \cdot \pi \cdot R \cdot (\cos \Theta_1 + \cos \Theta_2) - g \cdot d \cdot L^3, \quad (2)$$

где σ – поверхностное натяжение манжеты, Дж/м²;

d – плотность нижней частицы, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, кг·м/с²;

L – размер кубической частицы (рис. 3, в), м.

В реальных условиях в стекольной шихте возможна различная организация контактов капиллярно-стянутых частиц, в частности, более сложные контакты, образованные несколькими частицами (рис. 4). Проанализируем возможности отрыва нижней частицы от нескольких верхних частиц. Для сложных капиллярных ячеек при расчете суммарной силы сцепления формула для расчета будет аналогична уравнению (1), где добавляется множитель k , учитывающий угол наклона капиллярной силы в парных контактах к вертикальной оси и количество закрепленных частиц. Расчеты коэффициента k проведены исходя из геометрических построений. Для контакта «два шара – шар» $k \approx 1,732$; для контакта «три шара – шар» $k \approx 2,449$; для контакта «четыре шара – шар» $k \approx 2,828$. Следовательно, капиллярный контакт «четыре шара – шар» (рис. 4, в) будет наиболее благоприятным для закрепления нижней частицы.

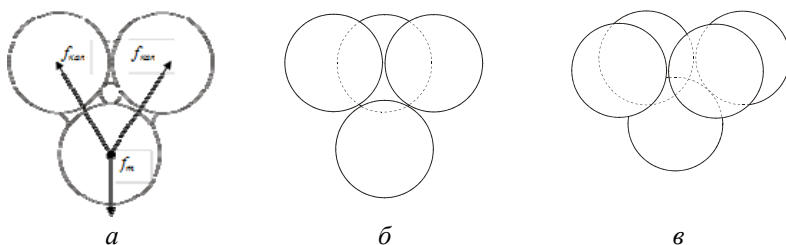


Рис. 4. Схемы капиллярного контакта:

а – два шара – шар; б – три шара – шар; в – три шара – шар

Рассмотрим капиллярно-гравитационное взаимодействие частиц, обладающих одинаковым смачиванием (рис. 5). По нашим измерениям

углы смачивания водой частиц песка, доломита, стеклобоя составляют $\Theta = 7\text{--}15^\circ$, частиц графита – $50\text{--}70^\circ$. При увеличении угла смачивания сила сцепления частиц существенно снижается, что связано, в первую очередь, с увеличением главного радиуса кривизны.

В реальной структуре шихты капиллярные контакты образованы, как правило, частицами разной природы, учитываемой углом смачивания и плотностью. Рассмотрим прочность таких капиллярных структур (рис. 6). На рис. 5, 6 показано, что наиболее интенсивное изменение силы тяжести относится к кубической частице.

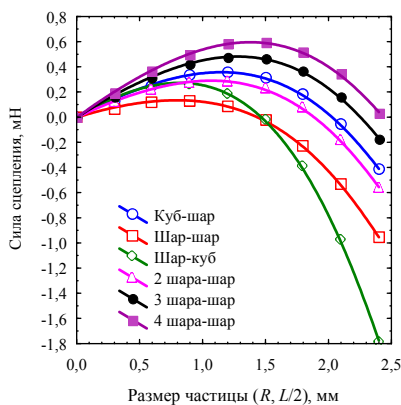


Рис. 5. Капиллярно-гравитационное взаимодействие частиц различной формы

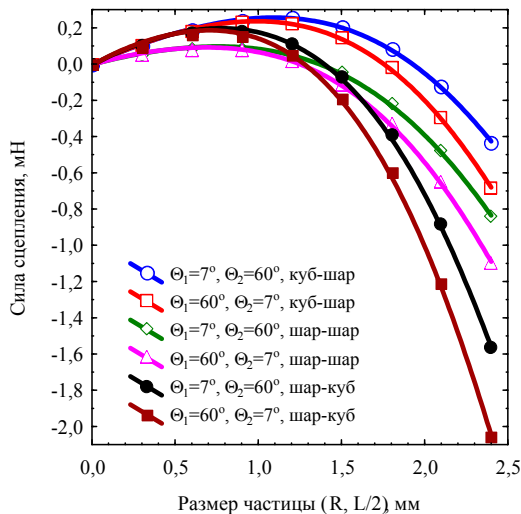


Рис. 6. Капиллярно-гравитационное взаимодействие частиц различной формы с разным смачиванием

Значения размеров частиц для различных капиллярных контактов и разных ускорений представлены на рис. 7. Допустим, что в условиях механических перегрузок и вибрации ускорение a составит $3g$, тогда значения размеров частиц снижаются приблизительно в 1,73 раза, а при $a = 5g$ – в 2,23 раза. При больших увлажнениях рассчитанные предельные параметры будут еще меньше.

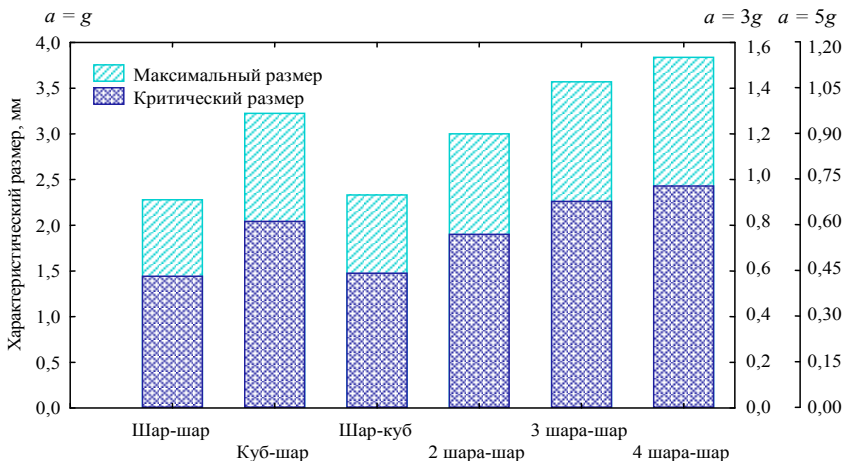


Рис. 7. Характеристические размеры частиц в различных капиллярных ячейках (совершенное смачивание)

Можно отметить, что размер частиц, для которых проведен анализ возможности сегрегации с учетом сил капиллярного взаимодействия и силы тяжести, соответствует реальным размерам частиц стекольной шихты, и роль капиллярных сил в поведении даже сравнительно крупных частиц оказывается существенной.

Таким образом, анализ капиллярно-гравитационного взаимодействия изомерных частиц применительно к процессам сегрегации показывает, что капиллярная сила способна противодействовать расслоению шихты.

1. Дерябин В. А., Фарафонтова Е. П., Малыгина О. Л. Капиллярное противодействие сегрегации частиц в процессах подготовки стекольной шихты // Стекло и керамика. 2006. № 1. С. 7–9.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКА, УЧИТЫВАЮЩАЯ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН УПЛОТНЕНИЯ

А. П. Поляков

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Построена математическая модель, позволяющая в зависимости от начальной пористости, массы и скорости движения инструмента, сил трения определять величину и характер распределения остаточной пористости в процессе ударного прессования порошка в цилиндрическом контейнере. Достоверность модели подтверждается сравнением с данными экспериментов. Рассмотрены особенности процесса ударного прессования в зависимости от соотношения масс заготовки и инструмента. Показано, что с повышением скорости инструмента остаточная пористость по высоте заготовки распределяется неравномерно вследствие волнового характера процесса.

The mathematical model allowing to determine depending on initial porosity, mass and speed of the movement of an instrument, friction forces the value and distribution of residual porosity during shock pressing of powder in the cylindrical container is constructed. Reliability of model is confirmed by comparison with experimental data. The features of process of shock pressing depending on a mass ratio of the blank and the tool are considered. It is shown that with increase of the tool velocity the residual porosity on height of blank is distributed non-uniform owing to wave nature of process.

Процессы динамического прессования широко применяются в порошковой металлургии, позволяя отказаться от использования крупногабаритного оборудования, повысить производительность процесса прессования [1]. При разработке технологических параметров указанных процессов следует обеспечить режим нагружения, позволяющий получить заготовку с заданными свойствами. Необходимо исследовать влияние на процесс размеров и исходной плотности заготовки, давления на фронте ударной волны, скорости инструмента, трения заготовки об инструмент и т. д. [2]. Динамическое прессование порошков исследовано многими авторами, в частности, в работах [1–8]. Случай, когда давление на пуансон создается в результате взрыва порохового заряда рассмотрен в [3]. В работе [4] с использованием модели идеально затвердевающего тела Прагера определены энергосиловые параметры процесса прессования порошка массивным бойком. Магнитно-импульсное компактирование порошков рассмотрено в [5, 8]. Указанные решения не

дают ответа на вопрос о распределении остаточной пористости по высоте заготовки, оно полагается равномерным. Это может существенно повлиять на результат, если необходимо получить заготовку с остаточной пористостью порядка 0,1...0,15 и выше. Неравномерность остаточной пористости при импульсном прессовании рассмотрена авторами [2], где в предположении линейной связи между скоростью фронта ударной волны и массовой скоростью получена формула, описывающая распределение плотности по высоте заготовки, но не приведены результаты ее конкретного применения. Также в указанных работах не рассматривается влияние трения на процесс уплотнения.

В статье исследовано влияние начальной скорости и соотношения масс порошка и инструмента, коэффициента трения при прессовании в цилиндрическом контейнере на величину и распределение пористости. Рассмотрены случаи, когда давление на заготовку передается посредством массивного бойка либо тонкой пластины.

Решение задачи динамического прессования порошков предполагает исследование процесса распространения ударных волн уплотнения. В этом случае происходящие под действием ударных волн необратимые изменения объема в материале рассматриваются на основе соотношений Адамара для поверхности разрыва [9]. Пусть пористое тело, находящееся в контейнере цилиндрической формы и имевшее исходные размеры h_0 и $2R_0$ подвергается ударному воздействию со стороны инструмента, движущегося со скоростью v_z (рис. 1). В результате происходит уплотнение заготовки. Приняты следующие допущения:

1. В исходном состоянии среда имеет постоянную плотность;
2. Пластические деформации локализованы на фронте ударной волны, за и перед фронтом ударной волны среда ведет себя как твердое тело (правомерность допущения подтверждается данными работ [5, 9]);
3. Время протекания процесса считаем малым, термодинамические эффекты, связанные с потоками тепла, можно не учитывать [1].

Рассмотрим процесс распространения ударной волны в идеальном пластически сжимаемом материале. В области непрерывных движений справедливы дифференциальные уравнения движения:

$$\sigma_{ji,j} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v_{i,j} v_j, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, ρ – плотность.

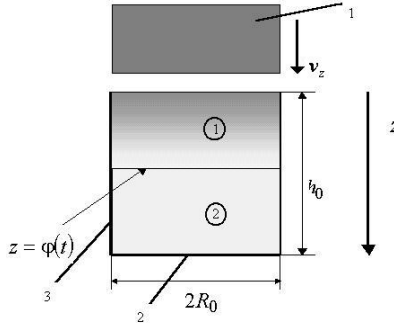


Рис. 1. Схема ударного прессования: 1 – ударник; 2 – контейнер; 3 – порошок

Уравнение (1) должно выполняться и в области 1 за фронтом ударной волны (рис. 1). С учетом $\int_{\Omega} \rho d\Omega = const$ имеем (индекс “0” относится к недеформированному состоянию):

$$\sigma_{zz} = \rho_0 \frac{\partial v_z}{\partial t} z - p(t), \quad (2)$$

где $p(t) = -\sigma_{zz}(z, t)|_{z=0}$ – давление в зоне контакта с инструментом.

Координаты точек, принадлежащих ударной волне, зависят от времени, $z = \varphi(t)$. Соотношения на ударной волне имеют вид $(\sigma_{zz}(\rho_0) - \text{напряжение в упругой волне, соответствующее переходу среды в пластическое состояние при плотности } \rho_0, (\dot{}) = \partial / \partial t)$ [9]:

$$\begin{aligned} \rho \{v - \dot{\varphi}(t)\} &= -\rho_0 \dot{\varphi}(t) \\ \sigma_{zz} - \sigma_{zz}(\rho_0) &= \rho \{v - \dot{\varphi}(t)\} v = -\rho_0 \dot{\varphi}(t) v \end{aligned} \quad (3)$$

Исключив из второй формулы (3) скорость $\dot{\varphi}(t)$, имеем

$$\sigma_{zz} - \sigma_{zz}(\rho_0) = -v^2 \rho_0 / (1 - \rho_0 / \rho). \quad (4)$$

Закон движения инструмента запишем в виде (M_u – масса инструмента, S – площадь поперечного сечения):

$$M_u (v|_{z=0})' = - \int_S p(t) dS. \quad (5)$$

Отсюда $p(t) = -M_u v' / S$. Подставив в (2) второе из уравнений (3) и учитывая (5), получаем (θ – пористость; ρ_κ – плотность компакта):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{M_u}{(1-\theta_0)\rho_\kappa S} v' &= -\varphi'(t)v - \varphi(t)v' + \frac{\sigma_{zz}(\theta_0)}{(1-\theta_0)\rho_\kappa} = \\ &= -\{\varphi(t)v\}' + \frac{\sigma_{zz}(\theta_0)}{(1-\theta_0)\rho_\kappa} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Пусть $A = M_u / [(1-\theta_0)\rho_\kappa S]$, $B = \sigma_{zz}(\theta_0) / [(1-\theta_0)\rho_\kappa]$
тогда

$$v = Av_0 + Bt / [A + \varphi(t)]. \quad (7)$$

Пусть $t_\epsilon = -Av_0 / B$ – время распространения ударной волны по частицам среды. Обозначив $\tilde{t} = t / t_\epsilon$, имеем

$$v = v_0 A(1 - \tilde{t}) / [A + \varphi(t)]. \quad (8)$$

Поскольку $\varphi(t) \geq 0$, выразим скорость в виде $v = v_0(1 - \tilde{t}) - \Delta v$, $\Delta v > 0$. При этом $\Delta v(0) = \Delta v(1) = 0$. Пусть $\Delta v = \beta \tilde{t}(1 - \tilde{t})$, где $\beta > 0$ – коэффициент, имеющий размерность скорости. Имеем

$$\begin{cases} v = (1 - \tilde{t})(v_0 - \beta \tilde{t}) \\ \varphi(t) = A\beta \tilde{t} / (v_0 - \beta \tilde{t}) \end{cases} \quad (9)$$

При этом скорость распространения фронта ударной волны равна

$$\varphi'(t) = -B\beta / (v_0 - \beta \tilde{t})^2. \quad (10)$$

Коэффициент β определим, используя условие текучести эллиптического типа [10]:

$$\sigma^2 / (\sigma_s^*)^2 + \tau^2 / (\tau_s^*)^2 = 1, \quad (11)$$

где τ – интенсивность касательных напряжений; σ – среднее нормальное напряжение; τ_s^* и σ_s^* – пределы текучести некомпактного материала на сдвиг и сжатие соответственно. Тогда σ_{zz} имеет вид ([10]):

$$\sigma_{zz} = -\left(1/\sqrt{3}\right) \left\{ 3(\sigma_s^*) + 4(\tau_s^*) \right\}^{1/2}. \quad (12)$$

Для определения τ_s^* и σ_s^* используем соотношения работы [11]:

$$\sigma_s^* = -\left(2/\sqrt{3}\right) \cdot \tau_s \ln(\eta/\theta), \quad \tau_s^* = \tau_s (1 - K\theta^\zeta), \quad (13)$$

где τ_s – предел текучести на сдвиг компактного материала; K, ζ, η – коэффициенты, характеризующие геометрию пор.

Подставим выражение для σ_{zz} в формулу (4):

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left\{ 3(\sigma_s^*(\rho_0)) + 4(\tau_s^*(\rho_0)) \right\}^{1/2} - \left\{ 3(\sigma_s^*(\rho)) + 4(\tau_s^*(\rho)) \right\}^{1/2} \right] = \right. \\ \left. = v^2 \frac{\rho_0}{(1 - \rho_0/\rho)} \right\}. \quad (14)$$

Последнее соотношение должно выполняться на ударной волне в любой момент времени. Подставив в (14) значение $v = v_0$, определим плотность ρ в момент времени $\tilde{t} = 0$, а из первой формулы в (3) $\varphi'(0)$. При этом согласно (11) $\varphi'(0) = -B\beta / (v_0)^2$. Имеем

$$\beta = -\varphi'(0)(v_0)^2 / B. \quad (15)$$

Плотность при прохождении ударной волны можно записать в виде

$$\rho = \rho_0 \frac{\varphi'(0)(v_0)^2}{\varphi'(0)(v_0)^2 - (1 - \tilde{t})(v_0 - \beta \tilde{t})^3}. \quad (16)$$

Пройдя по частицам среды путь h_0 , в прямом направлении ударная волна отражается. При ударе о жесткое основание напряжение на отраженной волне в момент удара $\sigma_{zz}(\rho_{om})$ определяется по методике [9]:

$$\sigma_{zz}(\rho_{om}) = 2\sigma_{zz}(\rho_{y0}) - \sigma_{zz}(\rho_0), \quad (17)$$

где ρ_{y0} – плотность заготовки на контакте с жесткой преградой к моменту отражения, определяемая по формуле (16).

На отраженной волне соотношения (3) имеют вид:

$$\begin{aligned} \rho_0^* \{v + \varphi'(t)\} &= \rho \varphi'(t) \\ \sigma_{zz} - \sigma_{zz}(\rho_0^*) &= -\rho \varphi'(t)v = -\rho_0^* \{v + \varphi'(t)\}v \end{aligned} \quad (18)$$

Закон движения отраженной волны неизвестен. Для двух линий с координатами $z = z_0$ и $z = z_1$ считаем, что кривая изменения массовой скорости в координатах " $v - \varphi(t)$ " на отраженной волне подобна аналогичной кривой на прямой волне. Рассматривая изменение массовой скорости при прохождении ударной волны от сечения $z = z_0$ до сечения $z = z_1$, имеем ("0" – прямая волна, "1" – отраженная):

$$(\Delta v_0 / \Delta h_0) \langle \varphi'_0(t) \rangle = (\Delta v_1 / \Delta h_1) \langle \varphi'_1(t) \rangle. \quad (19)$$

Учитывая, что закон движения прямой ударной волны известен, условие постоянства объема $\rho_0 \Delta h_0 = \rho_1 \Delta h_1$ и принимая, что скорость распространения фронта отраженной волны подчиняется тому же зако-

ну, что и скорость прямой волны, из формулы (19) можем определить массовую скорость на отраженной волне, а с помощью формулы (4) и изменение плотности.

В рамках модели можно учесть силы трения. Зададим их по закону Зибеля $\sigma_{rz} = -f\tau_s^*(r/R)$, где f – коэффициент трения. Имеем:

$$\sigma_{zz} - \frac{2f}{R} \int_0^z \tau_s^* dz = \rho_0 \frac{\partial v_z}{\partial t} z - p(t). \quad (20)$$

Введем $B^* = B - \frac{2f}{R} \int_0^z \tau_s^* dz / \{(1 - \theta_0)\rho_\kappa\}$. Подставив в (16) B^*

вместо B , получим уравнение для определения плотности.

Пусть начальная плотность распределена неравномерно по высоте заготовки. Интегрируя (21), получаем

$$\sigma_{zz} - \frac{2f}{R} \int_0^z \tau_s^* dz = \frac{\partial v_z}{\partial t} \int_0^z \rho dz - p(t). \quad (21)$$

При прохождении ударной волны через сечение с координатой $z = \varphi(t) \int_0^z \rho dz = \langle \rho \rangle \varphi(t)$ и в общем случае $\langle \rho \rangle \neq \rho_0$. Уравнение (6)

в этом случае примет вид ($A^* = A - (\Delta\rho/\rho_0)\varphi(t)$, $\Delta\rho = \langle \rho \rangle - \rho_0$):

$$A^* v' = -\{\varphi(t)v'\} + B^*. \quad (22)$$

Подставляя вместо A величину A^* , можно определить $\langle \rho \rangle$ и ρ .

Достоверность модели проверена сравнением данных расчета с результатами натурных испытаний. Использованы данные работ [3, 4] для железного порошка. В [3] рассмотрено прессование порошка при $\theta_0 \approx 0,7$ и $v_0 \approx 150 \div 200$ м/с. В [4] – при $\theta_0 \approx 0,5 \div 0,45$ и $v_0 \approx 4 \div 8$ м/с. В формулах (13) принято $K = 1$, $\eta = 1$, $\varsigma = 2/3$.

Результаты представлены на рис. 2. Видим удовлетворительное количественное и качественное совпадение данных расчета и эксперимента.

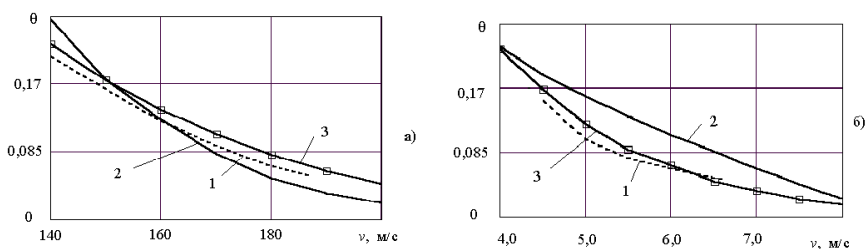


Рис. 2. Сравнение результатов расчета и эксперимента:
 кривые 1, 2 – данные работ [3] (а) и [4] (б).
 1 – эксперимент; 2 – расчет; 3 – расчет автора

Характер распределения плотности по высоте прессовки зависит от начальной скорости и массы инструмента. При большой массе бойка плотность распределяется практически равномерно. Пусть $m(t)$ – масса заготовки между бойком и фронтом волны. Поскольку $M_u \gg m(t)$, скорость меняется почти линейно, разница в плотности между слоями порошка незначительна. Отраженная волна является волной сжатия, приводящей к дополнительному уплотнению заготовки. Разница между плотностями верхней и нижней частей заготовки практически исчезает. Затем происходит отражение этой волны от бойка и т. д. При прессовании массивным бойком силы трения слабо меняют характер изменения плотности по высоте, приводя только к увеличению остаточной пористости. Разница в величине остаточной пористости существенно зависит от отношения h_0/R и коэффициента трения f . Результаты расчета представлены на рис. 3.

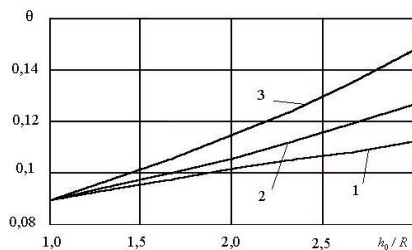


Рис. 3. Остаточная пористость заготовки в зависимости от отношения h_0/R и коэффициента трения f : 1 – $f = 0$; 2 – $f = 0,1$; 3 – $f = 0,2$

При высоких скоростях инструмента ($v_0 \approx 200 \text{ м/с}$ и более) на фронте ударной волны плотность меняется существенно неравномерно, при отражении ударной волны от донной части контейнера происходит резкое уплотнение нижних слоев заготовки. Интенсивность отраженной волны при этом резко затухает, и, как правило, она не достигает зоны контакта с инструментом. Результаты представлены на рис. 4.

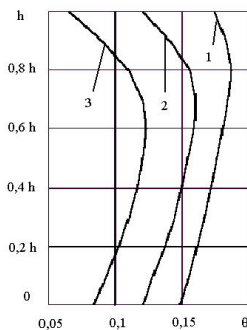


Рис. 4. Распределение остаточной пористости по высоте заготовки при различных начальных скоростях инструмента:

$$1 - v_0 = 180 \text{ м/с}, 2 - v_0 = 210 \text{ м/с}, 3 - v_0 = 240 \text{ м/с}.$$

Аналогичное распределение остаточной пористости по высоте получено в работе [2] экспериментально. Заметим, что с увеличением начальной скорости инструмента зона достижения минимальной оста-

точной пористости из области контакта заготовки с донной частью контейнера «смещается» в область контакта с инструментом (рис. 4). Это обусловлено тем, что с увеличением начальной скорости инструмента резко возрастает уплотнение в зоне контакта.

Выводы

1. Построена математическая модель динамического прессования порошковой заготовки в цилиндрическом контейнере, позволяющая в зависимости от начальной пористости, размеров заготовки, массы и скорости инструмента, сил трения определять величину и характер распределения остаточной пористости. Достоверность модели подтверждается сравнением с экспериментом.

2. При динамическом прессовании массивным бойком силы трения слабо меняют характер изменения плотности по высоте, приводя к увеличению остаточной пористости. Различие в величине пористости зависит от соотношения размеров заготовки и коэффициента трения.

3. При прессовании с высокими скоростями пористость распределяется по высоте существенно неравномерно. С увеличением начальной скорости инструмента зона достижения минимальной остаточной пористости из области контакта заготовки с донной частью контейнера «смещается» в область контакта с инструментом.

4. Результаты, полученные в статье, могут быть использованы при разработке научных основ совершенствования существующих технологий получения заготовок и изделий из порошковых металлических материалов основанных на применении импульсного нагружения.

1. Роман О. В., Горобцов В. Г. Импульсное нагружение порошковых материалов // Актуальные проблемы порошковой металлургии/ под ред. О. В. Романа, В. С. Аруначалама. М., 1990. С. 78–99.

2. Крупин А. В., Соловьев В. Я., Попов Г. С., Кръстев М. Р. Обработка металлов взрывом. М., 1991. 496 с.

3. Жданович Г. М. Теория прессования металлических порошков. М., 1969. 264 с.

4. Сердюк Г. Г., Свистун Л. И. Ударное прессование металлических порошков (теоретическое исследование) // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. Киев, 1985. С. 115–126.

5. Ivanov V. V., Nozdrin A. A. Method of determining dynamic adiabatic compression curves of powders // Technical Physics Letters. 1997. Vol. 23, Nr 7. P. 527–528.

6. *Hórlück S., Dimon P.* Statistics of shock waves in a two-dimensional granular flow // *Physical Review E*. 1999. Vol. 60, Nr 1. P. 671–686.
7. *Resnyansky A. D., and Bourne N. K.* Shock-wave compression of a porous material // *J. Appl. Phys.* 2004. Vol. 95, Nr 4. P. 1760–1769.
8. *Boltachev G. Sh., Kaygorodov A. S., Volkov N. B.* Densification of the granular medium by the low amplitude shock waves // *Acta Mechanica*. 2009. Vol. 207. P. 223–234.
9. *Nowacki W.K.* Stress Waves in Non-Elastic Solids. Oxford, U.K, 1978. 246 p.
10. *Грин Р. Дж.* Теория пластичности пористых тел // *Механика : сб. переводов*, 1973. № 4. С. 109–120.
11. *Polyakov A. P.* A model of porous material that takes into account the geometry of the pores // *Russian J. of Non-Ferrous Metals*. 2005. Vol. 46, Nr 8. P. 18–25.

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ ПРЕССОВОК ИЗ ПОРОШКА ЖЕЛЕЗА

П. А. Поляков, А. В. Долматов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Выполнена оценка прочностных свойств неспеченных заготовок из ванадийсодержащих порошков железа с добавками Zn, Cu, P, C. По результатам измерения твердости по Бринеллю и испытаний на осевое сжатие показано, что наибольшей прочностью обладают заготовки из исходного порошка и порошка с добавкой фосфора, а заготовка из порошка, легированного графитом, является наименее прочной. Испытания образцов на радиальное сжатие показали, что наименее прочными являются образцы с добавками фосфора и графита, что обусловлено малым сопротивлением срезу заготовок данного состава.

The strength properties of green compacts of iron-based vanadium-bearing powders with additions of Zn, Cu, P, C is made. By results of measurement of hardness according to Brinell's test and tests for uniaxial compression it is shown that the maximum strength received for a billet from initial powder and powder with a phosphorus additive, and the billet from the powder alloyed by graphite is the least strength. The results of radial compression test showed the minimum strength for a billets with addition of phosphorus and graphite that is caused by the small resistance to a cut of a billets of this mixture.

Современные тенденции в области порошковой металлургии связаны с получением материалов с принципиально новыми свойствами, малой неоднородностью свойств, высокой пластичностью. Так, для повышения прочности и твердости спеченного железа в железный порошок при приготовлении порошковой смеси вводят различные легирующие добавки, железографитные композиции обладают антифрикционными свойствами и т. д. В связи с этим возникает задача выбора оптимальных исходных составов смесей порошков и наполнителя, обеспечивающих формирование необходимых физико-механических, магнитных и иных свойств материалов.

Известно, что этап прессования в закрытой цилиндрической пресс-форме является одной из основных технологических операций обработки давлением порошковых материалов, поскольку в результате прессования получается заготовка, по форме и размерам соответствующая го-

товому изделию с припусками, необходимыми для последующих операций (выдавливание, прокатка и т. д.).

В статье была исследована прочность порошковых композиций, полученных механической активацией ванадийсодержащих порошков железа в смеси с Zn, Cu, P, C в количестве 1,5 мас. % на измельчителе вибрационном ИВ-микро. Шихты на основе порошка железного были получены в Институте металлургии УрО РАН и имели следующий химический состав, мас. %: 0,027 C; 0,160 Si; 0,144 Mn; 0,266 V; 0,530 O₂; Fe – основа. Для исследований были выбраны две партии порошка: фракция с размером частиц менее 315 мкм и фракция с размером частиц менее 160 мкм. В качестве добавок использовали порошки цинка распыленного, меди электролитической, порошок железо – фосфор и графит карандашный. Важность указанных исследований обусловлена, в частности, тем, что только за счет изменения состава и количества легирующих компонентов, способа их введения (механическая смесь или диффузионное связывание), применения эффективных смазок при их уменьшенном содержании в смеси и т. п., фирме Höganas AB (Швеция) удалось за 25 лет существенно повысить плотность, а следовательно, и прочность деталей из таких смесей (легированных порошков), не изменяя радикально технологию их изготовления [1, 2, 3].

Образцы для экспериментальных исследований были изготовлены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» УрО РАН при ИМАШ УрО РАН, универсальной гидравлической машине Tinius Olsen Super L60. Навески порошка 9 г и 1,7 г брикетировали односторонним прессованием в цилиндрической пресс-форме диаметром 9,6 мм при комнатной температуре и давлении 700 МПа. В результате получены цилиндрические заготовки высотой порядка 17–18 мм и вторая партия заготовок, «таблетки» высотой 3,3 мм, относительная плотность исследованных образцов составила $\rho = 0,87 - 0,91$, т. е. отличается незначительно от образца к образцу. Поэтому сравнение прочностных характеристик образцов с различной, вообще говоря, плотностью, можно считать достаточно корректным.

Для исследований были взяты по два образца каждой порошковой композиции. Поскольку оказалось, что плотности прессовок, полученных из композиций на основе железного порошка фракции менее 315 мкм и фракции менее 160 мкм, отличаются незначительно (в пределах 1,0–1,5 %), поэтому далее рассматриваются усредненные значения по обеим партиям. Прессовки обозначены следующим образом: П1 – исходный железный порошок; П2 – Fe+1,5%Zn; П3 – Fe+1,5%Cu; П4 – Fe+1,5%P; П5 – Fe+1,5%C [4].

Исследование прочностных свойств прессовок выполнено путем измерения твердости по Бринеллю НВ (для брикетов из 1-й партии), и также испытаний на осевое сжатие (1-я партия) и радиальное сжатие (2-я партия).

Твердость по Бринеллю (НВ) в соответствии с ГОСТ 9012-59 измеряли шариком $\varnothing 2,5$ мм при нагрузке 613Н на универсальном твердомере ИТ 5010 ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН. Результаты измерения твердости позволяют получить сравнительную оценку прочностных свойств прессовок. Так, в работе [5] в результате исследования образцов различной плотности из железного порошка, полученных изостатическим прессованием, установлено, что связь твердости НВ с пределом прочности при растяжении может быть удовлетворительно описана линейной зависимостью.

На рис. 1 даны результаты измерения величины НВ для всех исследованных образцов прессовок. С учетом выбора навески, а именно: отношение высоты $k \sim 2$ (см. выше), плотность по высоте образца (а значит, и твердость) распределена неравномерно. Поэтому приведено среднее значение твердости между значениями для верхней и нижней частей заготовки. Неравномерность распределения плотности по высоте подтверждают результаты металлографических исследований, выполненных в Институте металлургии УрО РАН, на шлифах после травления 4 % раствором азотной кислоты в спирте. Все образцы имеют общие особенности: плотную структуру верхнего торца с мелкими порами (со стороны приложения нагрузки) и рыхлую структуру нижнего торца с более крупными порами.

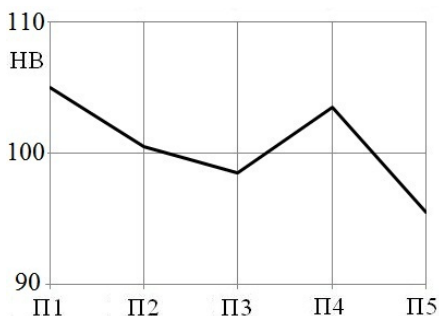


Рис. 1. Твердость НВ-прессовок при давлении 700 МПа

При этом для порошков П1-П4 различие между значениями НВ для верхней (наиболее плотной) и нижней (наименее плотной) частей прес-

совки примерно одинаково, тогда как для порошка П5 указанные значения достаточно близки. Результат, полученный для порошка П5, скорее всего, обусловлен более слабой зависимостью величины НВ от плотности прессовки (с увеличением плотности НВ возрастает медленнее, чем для прессовок из остальных порошков). Исходя из указанных соображений можем также сделать вывод о том, что наибольшую прочность обеспечивают порошки П1 (исходный) и П4 (с добавкой фосфора).

Таким образом, по результатам измерения твердости НВ, представленных на рис. 1, можно сделать вывод, что наибольшей прочностью обладают прессовки из порошков П1 (исходный) и П4 (с добавкой фосфора), наименьшей порошок П5 (с углеродом), тогда как порошки П2 и П3 (с добавками цинка и меди) обеспечивают средние значения прочности между порошками П1, П4 с одной стороны и порошком П5 с другой.

Для численной оценки предела прочности при сжатии компактного (беспористого) материала σ_{ϵ_0} можно использовать формулы, приведенные в [5]:

$$\sigma_{\epsilon} = \sigma_{\epsilon_0} \cdot (\rho_{\text{отн}})^{3,4}, \quad \sigma_{\epsilon} = 0,23HB.$$

В этом случае для состава П4 $\sigma_{\epsilon_0} = 391 \text{ МПа}$, а для П5 $\sigma_{\epsilon_0} = 323 \text{ МПа}$, т. е. различие составляет порядка 20 %. Значение σ_{ϵ_0} для порошка П1 близко к значению для порошка П4, тогда как величины σ_{ϵ_0} для порошков П2 и П3 являются промежуточными между максимальным и минимальным значениями для исследованных порошковых композиций и составляют порядка 350 МПа.

Заметим, что полученный результат, касающийся максимальной величины НВ для порошка с добавкой фосфора, хорошо коррелирует с результатами работы [8], согласно которым добавка фосфора к железу 0,3–0,8 % несколько увеличивает твердость по сравнению с исходным нелегированным порошком.

Также выполнены исследования прочностных свойств заготовок на осевое и радиальное сжатие, с использованием «бразильского» теста. «Бразильский» тест (Brazilian test), позволяющий определить предельную поверхность по критерию прочности Мора – Кулона в результате экспериментов по радиальному и осевому сжатию цилиндрических образцов. Этот способ наиболее часто используют для определения прочности хрупких материалов, в частности, неспеченных порошковых заготовок [6]. Для испытаний по «Бразильскому»

тесту предпочтительно использовать образцы со следующим соотношением размеров: для радиального сжатия отношение толщины к диаметру не более 0,25; для осевого сжатия отношение высоты к диаметру 2 [7]. Указанным соотношениям размеров и соответствуют прессовки, выбранные для проведения исследований (см. выше).

Для экспериментов по осевому сжатию использованы образцы из 1-й партии высотой от 17 до 18 мм, а для испытаний по радиальному сжатию – образцы из 2-й партии высотой 3,3 мм (см. выше). Схема проведения экспериментов по «Бразильскому» тесту показана на рис. 2.

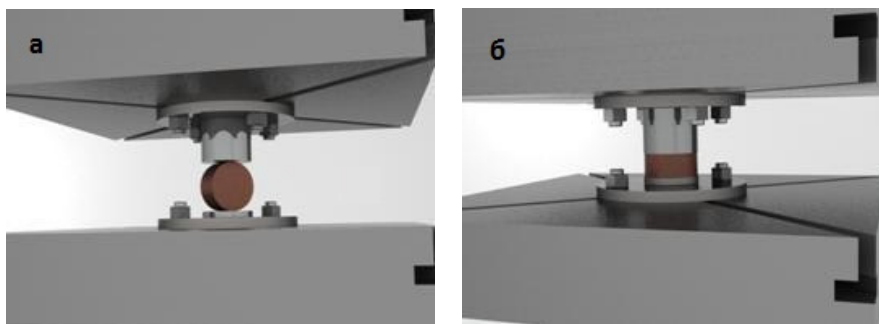


Рис. 2. Схема экспериментов по «Бразильскому» тесту:
а – радиальное сжатие; *б* – осевое сжатие

Экспериментальные исследования предела прочности на сжатие выполнены на оборудовании ЦКП Урал-М в Институте металлургии УрО РАН на универсальной машине для испытаний ZWICK BT1-AK050THW. A1K. Цилиндрические образцы диаметром 9,6 мм и высотой 17–18 мм испытывали на сжатие с предварительной нагрузкой 5 кг до максимального усилия разрушения, со скоростью движения траверсы испытательной машины 2 мм/мин. Для партии образцов диаметром 9,6 мм и высотой 3,3 мм предварительная нагрузка составляла 1 кг, а скорость движения траверсы также 2 мм/мин.

В момент пластического разрушения заготовки – возникновения и начала роста центральной трещины – фиксировали соответствующее усилие прессы и степень деформации заготовки. На основании полученных данных определяли интенсивность касательных напряжений τ и гидростатическое давление σ по следующим формулам [7]:

а) радиальное сжатие:

$$\tau = \sqrt{13} \cdot \frac{2F}{\pi D_0 t} \quad \sigma = \frac{2}{3} \cdot \frac{2F}{\pi D_0 t}; \quad (1)$$

б) осевое сжатие:

$$\tau = \frac{4F}{\pi D_0^2} \quad \sigma = -\frac{1}{3} \cdot \frac{4F}{\pi D_0^2}, \quad (2)$$

где F – усилие к моменту начала разрушения образца, D_0, t – диаметр и толщина образца соответственно.

Результаты испытаний образцов на осевое сжатие представлены на рис. 3 (σ_p – давление на заготовку к моменту начала разрушения). Видим, что результаты, представленные на рис. 3, хорошо коррелируются с теми, что получены при измерении твердости НВ, а именно: наибольшей прочностью обладают исходный порошок и порошок с добавкой фосфора, а наименьшей – порошок с добавкой графита.

Что касается испытаний на радиальное сжатие, картина несколько иная. В данном случае наименьшая прочность получена у порошков П4 и П5 (рис. 4). Для того чтобы объяснить полученный результат, рассмотрим уравнение предельного состояния Мора – Кулона:

$$\tau = \sigma \cdot \tan \beta + d, \quad (3)$$

где β – угол внутреннего трения, d – сопротивление срезу (сцепление).

Результаты расчета параметра d по формуле (3) представлены на рис. 5. Видим, что для порошков П1–П3 сопротивление срезу $d = 46 \div 48 \text{ МПа}$, тогда как для порошков П4 и П5 $d = 36 \div 37 \text{ МПа}$, т. е. значительно меньше. При этом картина изменения величины указанного параметра для различных типов порошковых композиций качественно соответствует результатам, полученным при испытаниях на радиальное сжатие. Заметим, что при испытаниях на радиальное сжатие сопротивление срезу в гораздо большей степени влияет на величину разрушающей нагрузки, чем при осевом сжатии, что и объясняет полученный результат.

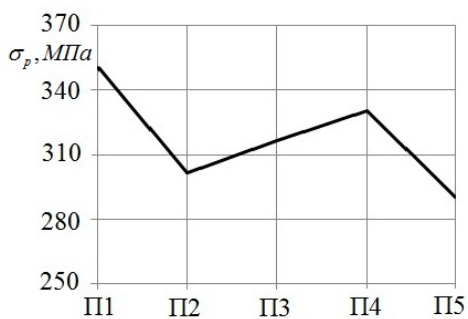


Рис. 3. Давление на заготовку, соответствующее моменту начала разрушения при осевом сжатии

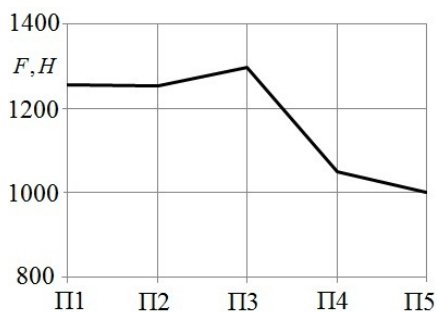


Рис. 4. Усилие к моменту начала разрушения заготовки при испытании на радиальное сжатие

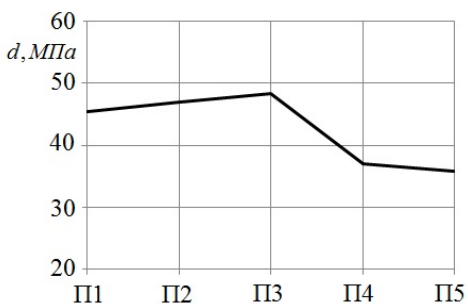


Рис. 5. Пределное сопротивление срезу при испытаниях на радиальное сжатие

На рис. 6 и 7 представлена характерная картина разрушения образцов в результате испытаний по «Бразильскому» тесту. На рис. 6 показан цилиндрический образец в момент разрушения. На рис. 7 показаны разрушенные образцы после испытаний на осевое и радиальное сжатие. Видим, что разрушение цилиндрического образца происходит от верхнего торца к нижнему по поверхности, расположенной под углом к оси приложения усилия, в то время как при испытании на радиальное сжатие разрушение происходит вдоль диаметра образца по центру. Данная картина хорошо соответствует результатам, представленным в работе [7].



Рис. 6. Цилиндрический образец в момент разрушения

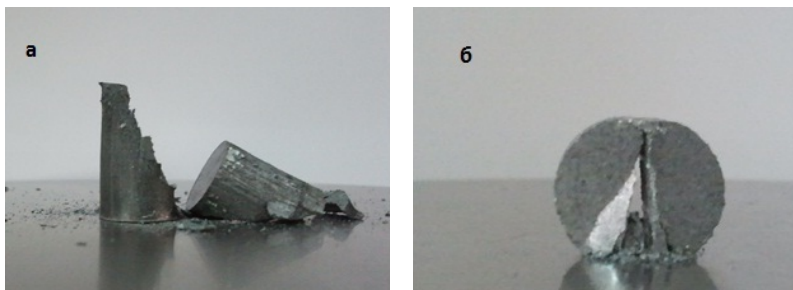


Рис. 7. Разрушенные образцы после испытаний на осевое (а) и радиальное (б) сжатие

Выводы

1. Для неспеченных заготовок из ванадийсодержащих порошков железа с добавками Zn, Cu, P, C в количестве 1,5 мас. %, полученных одноосным прессованием в цилиндрическом контейнере, выполнена оценка прочностных свойств путем измерения твердости по Бринеллю HB, а также по результатам испытаний на осевое и радиальное сжатие.

2. По результатам измерения твердости HB и испытаний на осевое сжатие показано, что наибольшей прочностью обладают заготовки из исходного порошка и порошка с добавкой фосфора, а наименьшей – из порошка, легированного графитом.

3. Испытания полученных образцов на радиальное сжатие показали, что в данном случае образцы из исходного порошка и порошка с добавками цинка и меди обладают примерно одинаковой прочностью, тогда как образцы с добавками фосфора и графита характеризуются значительно меньшими значениями разрушающей нагрузки. Это обусловлено различием в величине предельного сопротивления срезу для исследованных образцов.

1. Витязь П. А., Ильющенко А. Ф., Савич В. В. Порошковая металлургия в мире и в Беларуси: 1990–2010. Состояние, проблемы, перспективы // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка. Ч. 1 / ред. кол.: П. А. Витязь [и др.]. Минск, 2011. С. 22–54.

2. Витязь П. А., Шелег В. К., Ильющенко А. Ф., Савич В. В. Порошковая металлургия: современное состояние и перспективы // Порошковая металлургия. 2004. № 27. С. 5–29.

3. Wittaker D. Production of Structural PM Parts // International Powder Metallurgy Directory & Yearbook. 11th Edition. 2004/2005. P. 31–47.

4. Поляков П. А., Колмыков В. Л., Поляков А. П. Исследование процесса прессования композиционных материалов на основе ванадийсодержащего порошка железа // КШП ОМД, 2013. № 5. С. 14–18.

5. Акименко В. Б., Буланов В. Я., Гуляев И. А., Залазинский Г. Г., Калашикова О. Ю., Щенникова Т. Л., Анциферов В. Н. Состав, структура и свойства железных и легированных порошков. Екатеринбург, 1996. 351 с.

6. Proveti J. R. C., Michot G. The Brazilian test: a tool for measuring the toughness of a material and its brittle to ductile transition // International J. of Fracture, 2006. Vol. 139, Nr 3–4. P. 455–460.

7. *Doremus P.* Chapter 10: Calibration of Compaction Models, Series: Engineering Materials and Processes / eds. P. R. Brewin, O. Coube, P. Doremus and J. H. Tweed. Springer, 2008. P. 151–163.
8. *Chaurasia S. K., Prakash Ujjwal, Misra P. S., and Chandra K.* Development of P/M Fe–P soft magnetic materials // Bull. Mater. Sci., April 2012. Vol. 35, Nr 2. P. 191–196.

РАЗДЕЛЕНИЕ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ЦЕРИЯ, ИТТРИЯ И ЭРБИЯ В ВИДЕ АНИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА АНИОНИТЕ

М. А. Пономарева, О.В. Черемисина

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург

В работе изучен процесс сорбции анионных комплексов церия, иттрия и эрбия на слабоосновном анионите D-403. Рассчитаны значения емкости анионита, предельной сорбции комплексных ионов, значения констант ионообменного равновесия и значения энергий Гиббса ионного обмена. Значение предельной сорбции комплексных ионов подтверждены значениями ПДОЕ. На основе полученных данных исследован процесс разделения церия и эрбия, церия и иттрия.

In the paper studied the process of sorption of anionic complexes of cerium, yttrium and erbium in the weakly basic anionite D-403. Capacitance values of the anion exchanger, limiting sorption complex ions, ion exchange equilibrium constant values and the values of Gibbs energy of ion exchange were calculated. The value limiting sorption complex ions confirmed FDEC values. Based on these data, the process of separation of cerium and erbium, cerium and yttrium investigated.

В качестве объекта исследований выбраны комплексные соединения РЗЭ с трилоном Б в силу его особой устойчивости в растворах сложного состава и большим значением для практического использования в ионообменных процессах. Разделение РЗЭ представляет особый научный интерес вследствие близости их химических свойств. Несмотря на сравнительно отчетливую химическую специфичность группы РЗЭ, выделение лантаноидов из растворов сложносолевого состава представляет далеко не простую задачу. Актуальность работы обусловлена необходимостью получения новых термодинамических данных по сорбции лантаноидов на ионообменных смолах, позволяющих выбрать селективные аниониты для извлечения и концентрирования РЗЭ из разбавленных растворов с целью увеличения эффективности использования анионообменных смол при переработке низконцентрированного редкоземельного сырья.

Таким образом, целью работы является получение новых термодинамических данных по сорбции церия, иттрия и эрбия на новом селективном слабоосновном анионите D-403, на основании которых провести процесс разделения РЗЭ.

В работе [1] изучена сорбция иттрия на карбо- и сульфокатионитах. Установлены условия сорбции иттрия в зависимости от кислотности среды и формы катионита, определены кинетические характеристики сорбции.

В работе [2] проведено исследование по сорбции комплексов европия (III) с использованием химически модифицированных гексадецильных групп ($\text{SiO}_2\text{--C}_{16}$) и сверхсшитого полистирола (ССПС) из азотно-кислых растворов. Рассчитан коэффициент распределения, который составил для кремнезема $1 \cdot 10^2 \text{ см}^3/\text{г}$ и для ССПС $7 \cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{г}$. Сорбцию в динамических условиях проводили $\text{pH} = 5$. Изучена десорбция европия растворами HNO_3 разной концентрации.

Для исследования сорбционного процесса РЗЭ в виде анионных комплексов использовали следующие ионообменные смолы: АМ-17-8, D-407, ЭДЭ-10, Purolite A170/4675, Z6C15-Г, MiniX, АМ-2Б, EG003, D-403, представленные на отечественном и мировом рынках.

Исследовали процесс сорбции церия(III) в виде анионных комплексов с Трилоном Б при $\text{pH} = 3$ и температуре 298 К в статических условиях.

Величину степени извлечения вычисляли по формуле (1):

$$\alpha = \frac{C_0 - C_\infty}{C_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

где α – степень извлечения, %; C_0 и C_∞ – концентрация церия в исходном и равновесном растворах, соответственно, моль/кг.

Полученные значения степени извлечения ЭДТАцеррат-ионов в твердую фазу ионообменной смолы представлены в табл. 1.

Таблица 1

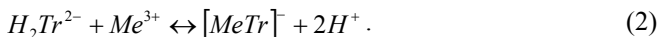
Значения степени извлечения для различных анионитов

Анионит	C_0 , моль/кг	C_∞ , моль/кг	pH_0	pH_∞	α , %
АМ-17-8	0,0633	0,0577	3,01	4,13	8,9
D-407	0,0633	0,0585	3,01	3,89	7,5
ЭДЭ-10	0,0633	0,0530	3,01	7,31	16,3
Purolite A170/4675	0,0633	0,0376	3,01	6,73	30,6
Z6C15-Г	0,0633	0,0486	3,01	4,27	23,2
MiniX	0,0633	0,0523	3,01	3,05	17,4
АМ-2Б	0,0633	0,0461	3,01	5,98	27,1
EG003	0,0582	0,0482	3,05	3,34	20,8
D-403	0,0675	0,0461	3,02	3,23	31,7

На основании полученных данных по степени извлечения церия (III) в твердую фазу ионообменной смолы выбраны анионит D-403 для дальнейшего изучения ионообменных процессов.

Анионит D-403 слабоосновный полистирольный хелатный анионит с активной функциональной группой в виде третичного атома азота с оксигидрильными группами. Перед экспериментом анионит переводили в нитратную форму.

Сорбция изучена из модельных растворов нитратов церия, иттрия и эрбия с добавлением в качестве комплексообразующего агента трилона Б в мольном соотношении 1 : 1 по стехиометрии реакции (2):



Образование комплексов этилендиаминтетраацетатцеррат-, этилендиаминтетраацетатиттрат- и этилендиаминтетраацетатэрбат ионов (ЭДТАцеррат-, ЭДТАиттрат-, ЭДТАэрбат-ионов) доказано комплексным кондуктометрическим и потенциометрическим титрованием растворов нитратов РЗЭ раствором трилона Б.

Величину сорбции анионитом D-403 изучали в статических условиях методом переменных концентраций при соотношении ж:т равном 5, рН = 3,298К при постоянной ионной силе 1 моль/кг, задаваемой нитратом натрия.

Величину сорбции Г (моль/кг) анионитом D-403 ЭДТАрзэ-ионов определяли по формуле (3):

$$\Gamma = \frac{(C_0 - C_{\infty}) \cdot \rho \cdot V_{\text{рас-па}}}{m_{\text{sorb}}} , \quad (3)$$

где C_0 и C_{∞} – исходные и равновесные концентрации ионов церия в исследуемом растворе, моль/кг; V , ρ – объем и плотность раствора; m – масса сухого анионита.

Величина сорбции анионита, предельной сорбции комплексных ионов, исходные и равновесные концентрации, а также значения среднеионных коэффициентов активности, рассчитанные на основе табличных данных [1, 2], представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента по сорбции комплексов церия с ЭДТАцеррат-, ЭДТАиттрат-, ЭДТАэрбат-ионов на анионите D-403 в нитратной форме при I=1 моль/кг*

C_0 , моль/кг	C_{∞} , моль/кг	Γ , моль/кг	$[NO_3^-]$, моль/кг	γ_{\pm}' , NaNO ₃	γ_{\pm} NaLnTr
[CeTr]					
0,0904	0,0669	0,1628	1,0235	0,539	0,874

C_0 , моль/кг	C_∞ , моль/кг	Γ , моль/кг	$[\text{NO}_3^-]$, моль/кг	γ_{\pm}' NaNO_3	γ_{\pm}' NaLnTr
[CeTr ⁻]					
0,0700	0,0478	0,1541	1,0222	0,539	0,871
0,0418	0,0287	0,0850	1,0131	0,540	0,867
0,0272	0,0160	0,0487	1,0112	0,541	0,865
0,0099	0,0028	0,0088	1,0071	0,542	0,862
0,0080	0,0022	0,0070	1,0058	0,542	0,862
[YTr ⁻]					
0,0547	0,0452	0,0585	1,1740	0,5244	0,7604
0,0464	0,0386	0,0552	1,1473	0,5270	0,7599
0,0360	0,0350	0,0528	1,1090	0,5308	0,7592
0,0209	0,0204	0,0351	1,0631	0,5356	0,7583
0,0081	0,0073	0,0072	1,0251	0,5399	0,7575
0,0069	0,0058	0,0045	1,0218	0,5403	0,7574
0,0047	0,0046	0,0028	1,0142	0,5411	0,7573
[ErTr ⁻]					
0,0558	0,0405	0,0920	1,1834	0,5300	0,7650
0,0437	0,0328	0,0888	1,1427	0,5334	0,7644
0,0251	0,0164	0,0716	1,0846	0,5385	0,7635
0,0090	0,0042	0,0227	1,0319	0,5434	0,7627
0,0067	0,0026	0,0126	1,0242	0,5442	0,7626
0,0054	0,0017	0,0072	1,0199	0,5446	0,7626

*Среднеионные коэффициенты активности для соединения NaLnTr принимали равными для $\text{NaC}_4\text{H}_9\text{COO}$ при данной ионной силе.

Изотермы сорбции церия, иттрия и эрбия в виде анионных комплексов с трилоном Б, построенные на основании табл. 2, представлены на рис. 1.

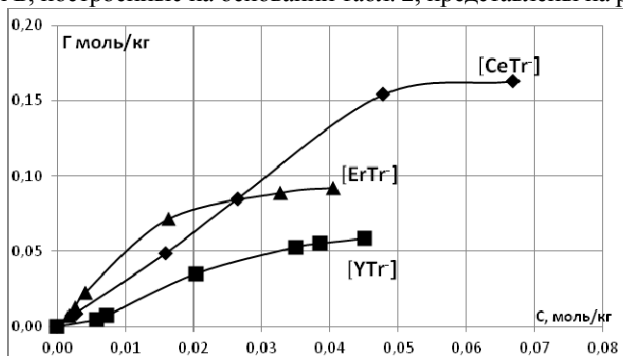
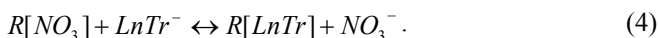


Рис. 1. Изотермы сорбции $[\text{CeTr}^-]$, $[\text{ErTr}^-]$, $[\text{YTr}^-]$ на анионите D-403 в нитратной форме при pH = 3

Термодинамический расчет изотерм сорбции проводили методом, основанном на линеаризации уравнения закона действующих масс, модифицированного для уравнения ионного обмена (4) с допущениями идеальности твердой фазы, т. е. коэффициенты активности равны единице и находятся в слабой зависимости от коэффициентов активности и природы комплексного ионна, однако в зависимости от концентрации раствора.



Уравнение закона действующих масс представлено формулой (5):

$$K = \frac{\Gamma_{LnTr^-} \cdot a_{NO_3^-}}{\Gamma_{NO_3^-} \cdot a_{LnTr^-}} = \frac{\Gamma_{LnTr^-} \cdot [NO_3^-] \cdot \gamma_{NO_3^-}}{\Gamma_{NO_3^-} \cdot [LnTr^-] \cdot \gamma_{LnTr^-}} = \frac{\Gamma_{LnTr^-} \cdot [NO_3^-] \cdot \gamma_{\pm NaNO_3}}{\Gamma_{NO_3^-} \cdot [LnTr^-] \cdot \gamma_{\pm LnNaTr}} . \quad (5)$$

После математического преобразования линейная форма уравнения закона действующих масс имеет вид:

$$\frac{1}{\Gamma_{LnTr}} = \frac{1}{\Gamma_{\infty}} + \frac{[NO_3^-] \cdot \gamma_{\pm NaNO_3}^2}{K \cdot \Gamma_{\infty} \cdot [LnTr^-] \cdot \gamma_{\pm LnNaTr}^2} . \quad (6)$$

Значения обратных концентраций комплексных ионов в твердой фазе и концентрационных аргументов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения обратных концентраций анионных комплексов эрбия в фазе анионита D-403 1/Γ от аргумента f(c)

[CeTr ⁻]		[YTr ⁻]		[ErTr ⁻]	
1/Γ	f(c)	1/Γ	f(c)	1/Γ	f(c)
6,14	5,82	17,0853	12,3637	10,8639	14,0393
6,49	8,19	18,1080	14,29408	11,2565	16,9650
11,77	13,70	18,9451	15,49082	13,9685	32,9108
20,53	24,81	28,4545	25,9475	44,0117	126,1265
113,57	142,56	139,0648	154,399	79,1290	198,8076
142,36	178,79	219,8813	248,153	139,1159	373,6005
		351,8522	401,252		

Линейные формы изотерм, построенные на основании табл. 3, представлены на рис. 2.

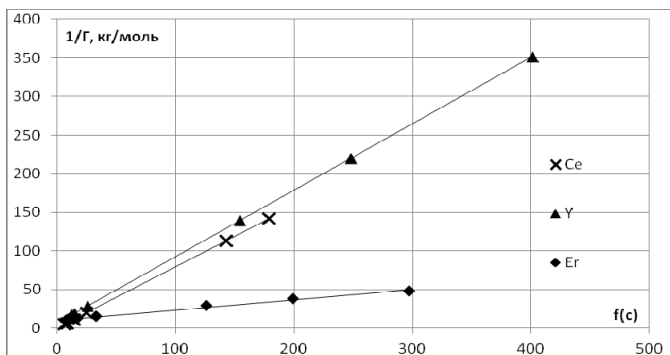


Рис. 2. Линейные формы изотерм сорбции анионных комплексов $[CeTr^-]$, $[ErTr^-]$, $[YTr^-]$ на анионите D-403 в нитратной форме при pH = 3

Обработкой методом наименьших квадратов линейных зависимостей явились следующие аппроксимирующие уравнения для церия (7), иттрия (8) и эрбия (9):

$$\frac{1}{\Gamma_{CeTr^-}} = 0,7912 \cdot f(c) + 0,8412, R^2 = 0,9997, \quad (7)$$

$$\frac{1}{\Gamma_{YTr^-}} = 0,862 \cdot f(c) + 5,9738, R^2 = 0,9995, \quad (8)$$

$$\frac{1}{\Gamma_{ErTr^-}} = 0,3626 \cdot f(c) + 3,6471, R^2 = 0,9962. \quad (9)$$

Согласно аппроксимирующим уравнениям рассчитали значения емкости анионита, предельной сорбции комплексных ионов, констант ионообменного равновесия и значений энергии Гиббса ионного обмена. Полученные данные представлены в табл. 4.

Таблица 4

Термодинамические характеристики сорбции комплексных ионов $[CeTr^-]$, $[ErTr^-]$ и $[YTr^-]$ на анионите D-403, переведенных в нитратную форму при pH=3

$[LnTr^-]$	Γ_{∞} , экв/кг	$\Gamma_{[LnTr^-]}$, моль/кг	$K_{равн}$	ΔG , Дж/моль
$[CeTr^-]$	$1,19 \pm 0,04$	$0,16 \pm 0,02$	$1,06 \pm 0,04$	$-151,86 \pm 7,59$
$[YTr^-]$	$0,17 \pm 0,02$	$0,058 \pm 0,003$	$6,93 \pm 0,28$	$-4796,29 \pm 143,89$
$[ErTr^-]$	$0,27 \pm 0,02$	$0,092 \pm 0,005$	$10,06 \pm 0,50$	$-5719,20 \pm 228,77$

Для подтверждения значений предельной сорбции комплексных ионов провели сорбцию анионных комплексов церия, иттрия и эрбия в динамических условиях. По выходным кривым сорбции (рис. 3, 4) рассчитали значения ПДОЕ и ДОЕ (табл. 5):

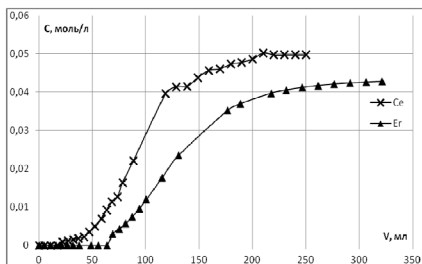


Рис. 3. Выходные кривые сорбции ЭДТАцеррат- и ЭДТАэрбат-ионов при pH = 3 на анионите D-403



Рис. 4. Выходная кривая сорбции ЭДТАиттрат-ионов при pH = 3 на анионите D-403

Рассчитанные значения ПДОЕ и ДОЕ представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты сорбции комплексных ионов $[CeTr^-]$, $[ErTr^-]$, $[YTr^-]$ в динамических условиях на анионите D-403 в нитратной форме при pH=3

	$[LnTr^-]$	ПДОЕ, моль/кг	ДОЕ, моль/кг
	$[CeTr^-]$	$0,21 \pm 0,02$	$0,022 \pm 0,001$
	$[YTr^-]$	$0,14 \pm 0,01$	$0,068 \pm 0,003$
	$[ErTr^-]$	$0,09 \pm 0,01$	$0,102 \pm 0,005$

Учитывая различие в значениях констант ионообменного равновесия анионных комплексов РЗЭ провели опыты по совместной сорбции ионов в динамических условиях на том же самом анионите с использованием фронтального варианта ионообменной хроматографии.

Выходные кривые сорбции анионных комплексов $[CeTr^-]$ и $[YTr^-]$, $[CeTr^-]$ и $[ErTr^-]$ на анионите D-403 представлены на рис. 5 и 6.

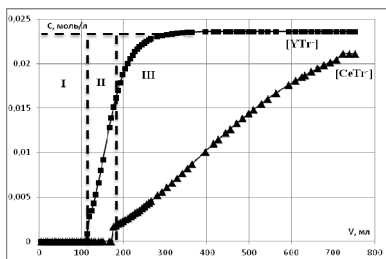


Рис. 5. Выходная кривая совместной сорбции анионных комплексов $CeTr^-$ и YTr^- на анионите D-403

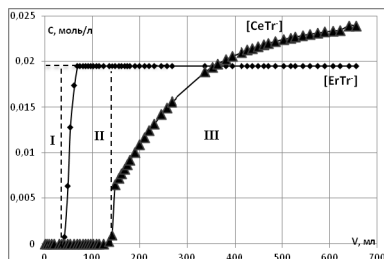


Рис. 6. Выходная кривая совместной сорбции анионных комплексов $CeTr^-$ и $ErTr^-$ на анионите D-403

Полученные значения ПДОЕ и ДОЕ ионов $CeTr^-$, $ErTr^-$ и YTr^- в совместном присутствии представлены в табл. 6.

Таблица 6

Значения ПДОЕ и ДОЕ совместной сорбции ионов

$CeTr^-$ и YTr^- ; $CeTr^-$ и $ErTr^-$

Разделение $CeTr^-$ и YTr^-	Ce	Y
C_0 , моль/л	0,0211	0,0236
ПДОЕ, моль/кг	$0,34 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,02$
ДОЕ, моль/кг	$0,14 \pm 0,03$	$0,090 \pm 0,005$
Разделение $CeTr^-$ и $ErTr^-$	Ce	Er
C_0 , моль/л	0,0239	0,0195
ПДОЕ, моль/кг	$0,17 \pm 0,02$	$0,036 \pm 0,002$
ДОЕ, моль/кг	$0,11 \pm 0,03$	$0,027 \pm 0,006$

На рис. 5 и 6 отчетливо видны три участка, первый из которых соответствует одновременной сорбции анионов и достижением величины ДОЕ по YTr^- и $ErTr^-$ -ионам, второй – достижением величины ДОЕ ионов $CeTr^-$, и третий участок соответствует достижению ПДОЕ $CeTr^-$, YTr^- и $ErTr^-$ -ионов.

По площади второго выделенного участка оценили количество «вышедших» из колонки индивидуальных комплексных ионов иттрия и эрбия, что составляет количественную основу процесса разделения индивидуальных РЗЭ. Доля чистого анионного комплекса иттрия на выходе из колонки составляет 34 % и эрбия – 84 % от общего количества сорбированных ионов на втором участке. Следовательно, число циклов, обеспечивающее полное отделение иттрия от церия и эрбия от церия, рассчитанное по формуле

$$N = \frac{S_{III}}{S_{II} \cdot \omega_{Ln} + ДОЕ_{LnTr} \cdot m_{sorb}} + 1 \quad (10)$$

составляет не менее 6 циклов.

В качестве десорбирующего агента использовали раствор HNO_3 концентрацией 2 н.

-
1. Мурсалимова М. Л., Сальникова Е. В. Особенности сорбции иттрия на карбоксильных и сульфокатионитах // Вестн. ОГУ. 2004. № 6. С. 130–134.
 2. Бикмуллина А. Р., Терещенкова А. А., Статкус М. А. и др. Сорбция комплекса европия (III) с ацетилацетоном на гидрофобизированном кремнеземе и на сверхшитом полистироле // Вестн. Моск. ун-та. 2013. Т. 54, № 4. С. 210–215 (Сер. 2. Химия).
 3. Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 10-е / под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. СПб., 2003. 240 с.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕДНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКЕ

А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

В работе выполнен расчет деформированного состояния в процессе сортовой прокатки медной заготовки прямоугольного поперечного сечения в черновых проходах. Описаны основные аспекты постановки задачи конечно-элементного моделирования. Приведены результаты расчетов в виде распределения степени деформации по проходам в изометрии и продольном сечении. Установлено, что деформированное состояние заготовки отличается значительной неоднородностью. Сделаны выводы о характере локализации и распространения деформации в нечетных и четных проходах.

In the present paper strain state calculation in the shape rolling process of rectangular cross section copper bar in rough passes is preformed. Main aspects of finite-element modeling problem formulation are described. The calculation results of strain distribution by passes in isometric view and longitudinal direction are outlined. It has been established that the deformed state of the bar has considerable heterogeneity. The conclusions about localization and spreading of deformation in odd and even passes are also made.

Медь находит широкое применение в таких отраслях промышленности, как электроэнергетика, машиностроение, строительство и т. д. При этом наиболее востребованным видом продукции являются различные деформированные полуфабрикаты и, в частности, медная катанка, производство которой в последние годы осуществляется преимущественно методами совмещенных процессов литья-прокатки по технологическим схемам SOUTHWIRE (США), CONTIROD (Германия) и CONTINUUS PROPERZI (Италия). Общим для всех перечисленных технологий производства катанки является получение непрерывно-литой заготовки той или иной конфигурации и ее последующая горячая сортовая прокатка на заданный диаметр. Процесс изготовления завершают операции охлаждения, осветления, нанесения воскового протекционного покрытия и смотка готовой катанки в бухты.

Объектом исследования настоящей работы являются черновые проходы сортовой прокатки непрерывно-литой заготовки прямоугольного поперечного сечения, осуществляемые в рамках процесса CONTIROD.

Цель исследования состоит в количественной оценке величины неоднородности деформации в продольных и поперечных направлениях, выявлении зон локализации деформации, изучении динамики формоизменения посредством конечно-элементного моделирования процесса. В табл. 1 обозначены номера исследуемых проходов, используемые в них калибры с указанием их основных размеров.

Таблица 1

**Типы и основные размеры калибров,
используемых в черновой группе**

№ прохода	Тип калибра	Размеры калибра, мм		
		Ширина вреза	Глубина вреза	Зазор
1	Ящичный (прямоугольный)	140/120	20,50	3
2	Ящичный (прямоугольный)	66/46	30	10
3	Овальный	100	12,10	5
4	Круглый	43,88	18	4

Для непрерывно-литой заготовки характерно крупнозернистое дендритное строение, обусловленное направленным отводом тепла при кристаллизации. Подобная структура обладает существенной анизотропией и неоднородностью свойств, подробно описанной и исследованной в работах [1–4]. Это обстоятельство постулирует дополнительные требования при назначении режимов деформации в черновых проходах, призванных осуществить ликвидацию литой структуры, определяя тем самым актуальность задачи моделирования формоизменения и исследования неоднородности распределения деформации в черновых проходах при различной совокупности определяющих параметров.

Конечно-элементное моделирование процесса прокатки и последующий анализ деформированного состояния выполнялись в программном комплексе DEFORM. Модель исходной заготовки (перед первым проходом) представляет собой прямоугольный параллелепипед размерами 350/120/70 мм. Форма и размеры моделей заготовок в каждом последующем проходе прокатки определяются результатами моделирования в предыдущем проходе. Деформированное состояние при этом не наследуется. Совокупность размерных данных моделей заготовок по проходам приведена в табл. 2.

Таблица 2

Размеры моделей заготовок по проходам

№ прохода	Размеры модели заготовки, мм	
	Высота	Ширина
1	46	128,86
2	70	53/54,96
3	29,20	83,71
4	40	39,94

Реологические свойства в условиях выбранной пластической упрочняющей среды определены кривыми упрочнения меди марки М001 [5]. Трение на границе между заготовкой и валками определено посредством закона трения Зибеля с переменным значением показателя трения, зависящим от температурно-скоростных условий прокатки [6].

Температуры моделей заготовок во 2, 3 и 4 проходах определены методом линейной интерполяции, на основании данных производственных измерений перед первым и пятым проходами, составляющих 880 °С и 780 °С соответственно [6]. Температура валков во всех проходах назначена равной 200 °С. Значение обобщенного коэффициента теплопередачи составляет 5 Н/с/мм/ °С.

Частоты вращения валков в каждом из проходов соответствуют регламентированному производственному режиму.

Обобщенные параметры моделирования прокатки в черновой группе приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры моделирования прокатки в черновой группе

№ прохода	Температура модели заготовки, °С	Показатель трения	Частота вращения валков, об/мин
1	880	0,552	10,82
2	855	0,657	18,07
3	830	0,578	28,21
4	805	0,667	48,45

На рис. 1, а–г приведен общий вид деформированной заготовки по проходам, иллюстрирующий распределение степени деформации в стационарной стадии моделируемого процесса.

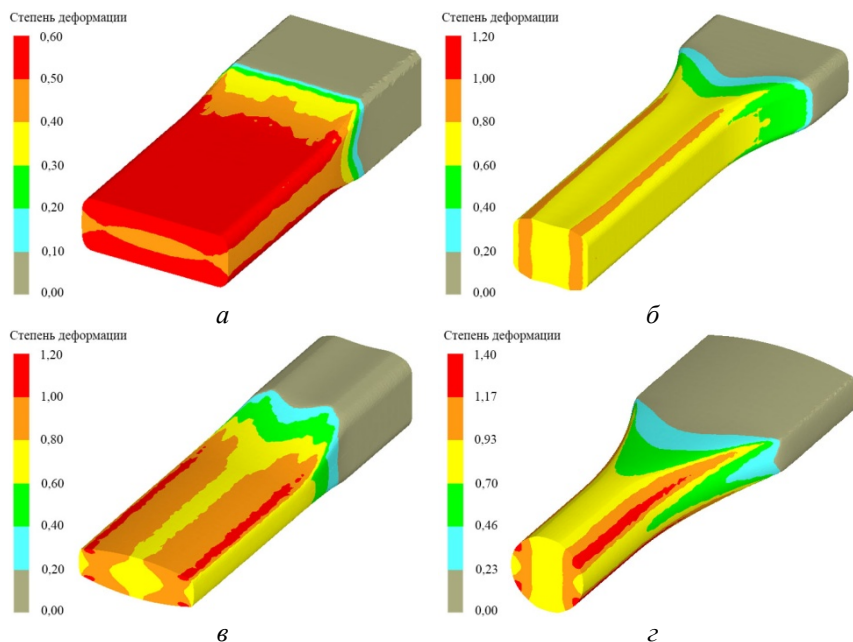


Рис. 1. Распределение степени деформации на общем виде деформированной заготовки по проходам:

a – первый проход; *б* – второй проход;
в – третий проход; *г* – четвертый проход

Видно, что деформированное состояние во всех исследуемых проходах является существенно неоднородным, при этом можно также наблюдать зоны, где деформация протекает наиболее интенсивно. Для первого прохода это приконтактные области заготовки, степень деформации которых находится в пределах 0,5–0,6, в то время как центральная часть и свободная боковая поверхность имеют степень деформации, равную 0,4–0,5, что в среднем в 1,2 раза меньше. Распространение деформации в объеме заготовки происходит перпендикулярно дну калибра в границах его площади от приконтактных областей к центральным. Во втором проходе зоны повышенной деформации расположены в области выпусков калибра, на границе контактной и свободной поверхностей. Обозначенные зоны образуются в результате распространения деформации от выпусков в центральную область заготовки в границах площади ручьев и характеризуются значением степени деформации 0,8–1,0. Остальные части заготовки имеют степень деформации 0,6–0,8, т. е. деформируются в 1,3 раза меньше. В третьем проходе наибольшие

деформации (степень деформации составляет 1,0–1,2) локализованы на периферии калибра, при этом наблюдается их встречное распространение вглубь объема заготовки с последующим слиянием в площади калибра. Стоит отметить, что прилегающая боковая кромка претерпевает значительно меньшую деформацию (0,6–0,8). Это же справедливо и для центральной части заготовки. Таким образом, отношение максимального значения степени деформации в данном проходе к минимальному составляет приблизительно 1,6. Зоны, характеризующиеся максимальными значениями (1,17–1,4) степени деформации, в четвертом проходе расположены по дугам окружности, примыкающим к месту развала калибра. Зоны также проявляют тенденцию к встречному распространению и слиянию, но, в отличие от предыдущего прохода, слияние зон происходит в площади ручьев верхнего и нижнего валка. Степень деформации центральной области заготовки и ее боковой поверхности оказывается меньшей в 1,6 раза и составляет 0,7–0,93.

Можно заключить, что во всех рассмотренных проходах степень деформации центральной и боковой областей заготовки оказывается в 1,2–1,6 раза меньше степени деформации приконтактных областей и кромок. В случае неполного протекания процесса рекристаллизации это может привести к накоплению отрицательного влияния неоднородности деформированного состояния и образованию характерной структуры деформации. Кроме того, вследствие очевидного чередования характера распространения зон повышенной деформации (в площади ручья или площади калибра) по проходам, осуществление кантовки заготовки приводит к локализации деформации в одних и тех же областях, что еще больше способствует формированию существенно неоднородного деформированного состояния.

Дальнейшее изучение неоднородности распределения степени деформации проводилось посредством построения продольных сечений деформируемой заготовки по проходам, представленных на рис. 2. Из рис. 2 видно наличие в очаге деформации характерных зон, специфической с-образной формы с одинарным (первый и третий проходы) или двойным изгибом (второй и четвертый проходы). Значения степени деформации обозначенных зон и коэффициенты отношения между ними совпадают с описанными выше в соответствии с равенством размерных шкал. Направление изгиба зон позволяет делать вывод о динамике формоизменения в каждом из исследуемых проходов: изгиб в направлении прокатки говорит о распространении деформации от приконтактных слоев в центральную часть, изгиб в направлении, противоположном направлению прокатки, – о распространении деформации от центральных областей к периферийным. Наличие двойного изгиба, таким обра-

зом, соответствует изменению направления распространения деформации, что можно связать с подпирающим действием сил трения и соответствующей интенсификацией деформаций внутреннего сдвига. В свою очередь, это приводит к локализации деформации в площади ручья, что соответствует вышеизложенным выводам для второго и четвертого проходов. В том случае, если двойной изгиб в сечении не наблюдается, локализация деформации происходит в приконтактных зонах, а их последующее встречное слияние – в площади калибра. Это также согласуется с ранее сделанными выводами.

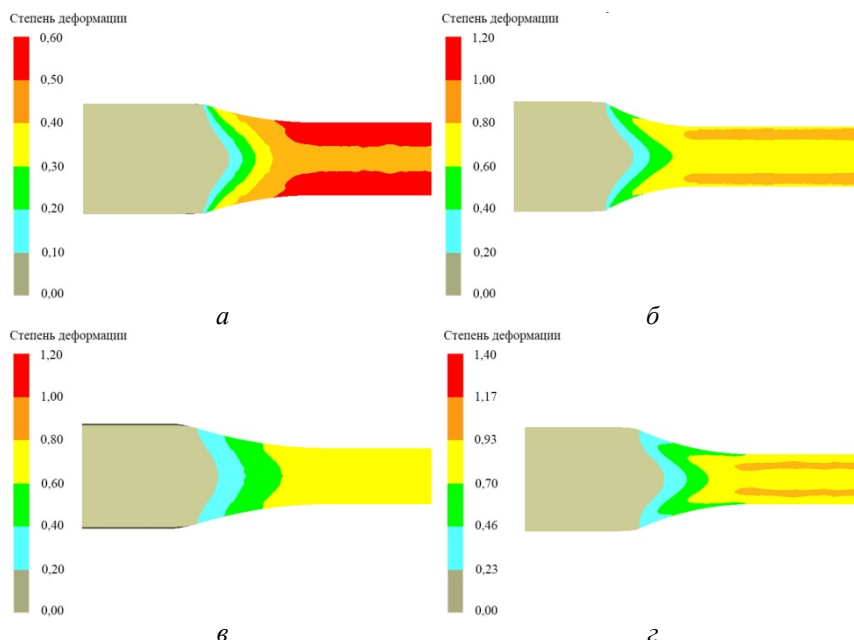


Рис. 2. Распределение степени деформации в продольном сечении деформированной заготовки по проходам:
а – первый проход; *б* – второй проход;
в – третий проход; *г* – четвертый проход

Таким образом можно заключить:

- что деформированное состояние заготовки во всех проходах характеризуется значительной неоднородностью;
- центральная и боковая области заготовки во всех проходах деформируются меньше, чем приконтактные области и кромки;

– в нечетных проходах зоны повышенной степени деформации, их встречное распространение и слияние происходит в площади калибра, в четных проходах – в площади ручья;

– распространение деформации в нечетных проходах осуществляется от приконтактных слоев в центральную область заготовки, в четных проходах происходит изменение направления с распространением деформации областей к периферийным.

1. *Loginov Yu. N., Demakov S. L., Illarionov A. G., Ivanova M. A., Romanov V. A.* Structural condition of copper wire rod, obtained during the continuous casting // *Rolling process. Tsvetnye Metally*. 2013. Iss. 8. P. 87–92.

2. *Логинов Ю. Н., Мысик Р. К., Титов А. В., Романов В. А.* Влияние направления кристаллизации на анизотропию пластического течения непрерывнолитой меди // *Литейщик России*. 2008. № 10. С. 36–38.

3. *Логинов Ю. Н., Зуев А. Ю.* Формоизменение и сопротивление деформации анизотропной непрерывно-литой меди // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. № 1. С. 32–37.

4. *Логинов Ю. Н., Илларионов А. Г., Демаков С. Л., Иванова М. А., Мысик Р. К., Зуев А. Ю.* Неоднородность структуры непрерывнолитой меди // *Литейщик России*. 2011. № 11. С. 28–32.

5. *Prasad Y. V. R. K., Sasidhara S.* Hot working guide : a compendium of processing maps. Ohio, 1997. 545 p.

6. *Логинов Ю. Н., Инатович Ю. В., Зуев А. Ю.* Исследование контактного трения при непрерывной горячей прокатке катанки из электро-технической меди // *Производство проката*. 2010. № 2. С. 14–18.

ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАНОБАР-КОДА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Е. И. Пряхин, Е. А. Захаренко

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург

В статье приводятся характеристики информационного поля: описание внешнего вида, сравнение размеров с QR Code; виды и объем записываемой информации, последовательность кодирования информации в коде. Описана мультифункциональность кода. Представлены система распространения и обмена ключами; система формирования – нанесения – считывания и декодирования информационного поля. Рассмотрены преимущества перед существующими аналогами.

The article presents the characteristics of the information field: appearance description, comparison of size with QR Code; types and volume of recorded information, the sequence information coding in code. There was described the functionality of the code. The system of distribution and exchange of keys are presented and the system of formation – application – read and decode the information field as well. Advantages over existing analogues are discussed.

Известно, что сегодня для идентификации продукции и в качестве информационного носителя все шире стали использоваться двухмерные матричные коды, такие как QR Code, Data Matrix и др., и это можно считать положительным фактом, так как при использовании приложений для гаджетов появилась возможность у широкого круга пользователей получать мобильную информацию через Интернет об интересующих их продуктах. В какой-то мере эти коды, давая определенную информацию о продуктах, способствуют их защите от подделок. Но эффективно защищать продукцию они не могут по следующим причинам:

- как правило, эти коды наносятся на промежуточные носители-этикетки, бирки, упаковку и т. п. Данное обстоятельство способствует легкой замене одних кодов другими, в том числе псевдoleгальными;
- это открытые общедоступные коды, которые легко клонируются и копируются, а следовательно, их легко можно продублировать на нелегальной продукции.

Кроме того, информационная емкость таких кодов относительно небольшая при тех допустимых размерах кодов, которые могут быть реально размещены на готовой продукции или использоваться в качестве

информационного носителя. Как правило, это 100–200 символов, что зачастую недостаточно для полной информации о продукте. Предлагаемая система является гибкой и многофункциональной системой защиты продукции, включающей в себя непосредственное формирование на поверхности изделия оригинального кода в виде двухмерного кода – нанобар-кода (НБК) и представление кода в виде цифрового растрового изображения bmp-формата (рис. 1).



Рис. 1. Система учета с использованием НБК

Предложенная система защиты продукции обладает следующими характеристиками:

- НБК – двухмерный матричный код с оригинальным дизайном (рис. 2);

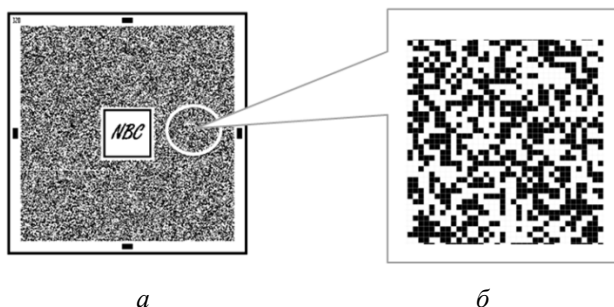


Рис. 2. Вид НБК:
а – общий вид; б – с увеличением

– информационная емкость НБК увеличена за счет использования современных эффективных алгоритмов записи информации. При сравнении представленного кода и QR Code при одинаковом количестве символов наглядно видно преимущество информационного поля как по размеру кода, так и по информационной емкости (рис. 3).


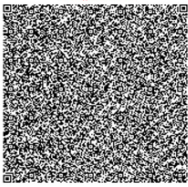


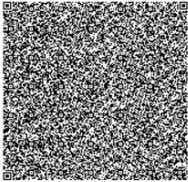


QR Code	QR Code	NBC	NBC
100 символов/250 мкм 43,0х43,0	1000 символов / 100 мкм 67,6 х 67,6 мм	1000 символов/100 мкм 19,2 х 19,2 мм	1000 символов/ 50 мкм 9,6 х 9,6 мм
			
	1000 символов/100 мкм 67,6 х 67,6 мм	8000 символов /100 мкм 36,8 х 36,8 мм	8000 символов /50 мкм 18,4 х 18,4 мм
			

Рис. 3. Сравнение НБК и стандартного QR Code

Важной особенностью кода является возможность записи в нем не только символьной, но и любой другой цифровой информации: графической, аудио, видео (рис. 4).

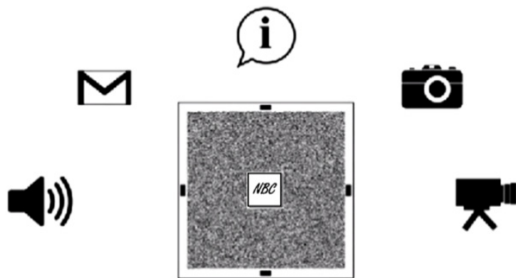


Рис. 4. Виды кодируемой информации в НБК

Особенностью предложенного кода является то, что специальное программное обеспечение позволяет выполнять шифрование перед кодированием информации (рис. 5).



Рис. 5. Последовательность шифрования, кодирования и формирования НБК

Размещаемая в НБК информация может быть частично или полностью закрытой для посторонних пользователей, т. е она может шифроваться с использованием стандартных алгоритмов шифрования. При этом в коде применяется и симметричное AES, и асимметричное RSA-шифрование.

В общем виде в системе заложена мультифункциональность, предполагаемая возможность генерирования различных комбинаций самого кода (рис. 6).

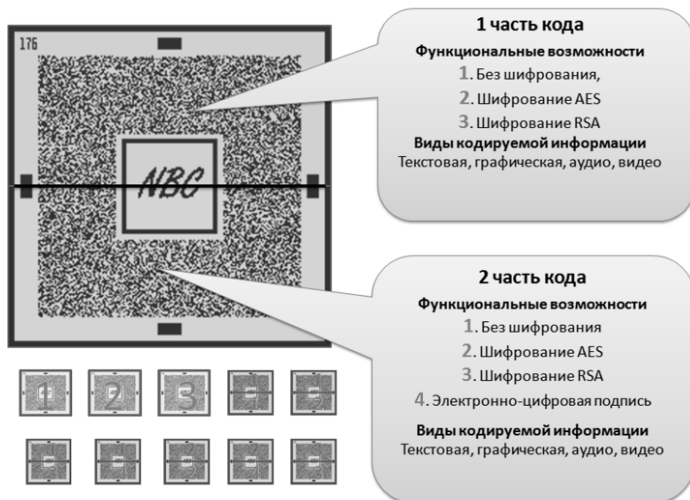


Рис. 6. Мультифункциональность НБК

При формировании «открытого» кода имеется возможность его использования в качестве локальной базы данных, т. е. хранилища информации (до 10 000 000 знаков или до 10 Мб битовой информации).

Код может использоваться для идентификации и защиты от подделок (контрафакта) легальной продукции. В этом случае могут быть рекомендованы следующие два варианта технологии формирования:

- нанесение НБК на специальные полимерные пленки (TessaLaser), позволяющие в автоматическом режиме формировать этикетки разного размера, обладающие способностью разрушаться при попытке их снятия с поверхности изделия;

- нанесение НБК непосредственно на изделия для одной группы лазеров (волоконные) в качестве маркирующих материалов могут использоваться различные металлы, пластики и резина, а для другой группы лазеров (С02) возможно нанесение кода на дерево, бумагу, картон, стекло и оргстекло.

Важной составной частью всей системы применения кода для идентификации и защиты продукции является этап считывания и распознавания помещенной в него информации. Учитывая высокую плотность записанной в НБК информации, для его считывания разработаны мобильные и стационарные сканеры, обеспечивающие возможность увеличения считываемого изображения до 10 раз и специальное программное обеспечение для преобразования изображения и декодирования ин-

формации, содержащейся в коде. Кроме того, создано специальное мобильное приложение, работающее в ОС Android, позволяющее считывать и декодировать информацию с помощью мобильных телефонов.

С помощью этих оптических систем код считывается как по USB, так и по Wi-Fi соединению, изображение передается на ПК, где и происходит его распознавание и декодирование информации.

Таким образом, общий цикл всей системы применения кода включает в себя следующие этапы (рис. 7):

- кодирование информации на ПК;
- формирование управляющей программы для лазера;
- процесс непосредственного нанесения кода на изделие с помощью лазера;
- считывание с использованием оптической системы и перенос его изображения на ПК;
- декодирование занесенной информации;
- идентификация продукции.

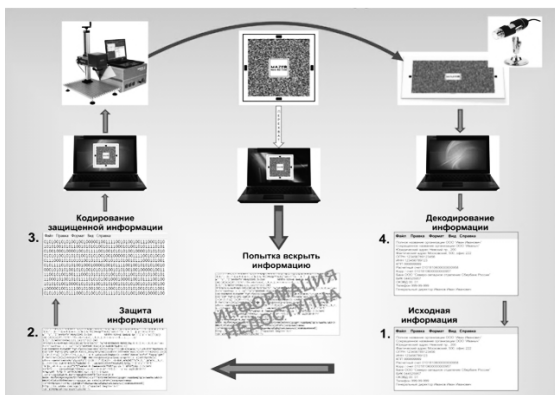


Рис. 7. Система функционирования НБК

Подводя итог, скажем также о том, что информационное поле может быть использовано для идентификации продукции и защиты ее от подделок, выполняя при этом функцию локальной базы данных, содержащей информацию о маркированном продукте. Информация, содержащаяся в НБК, может быть представлена в любом цифровом виде. При этом объем кода может достигать объема 10 Мб и иметь гораздо меньшие размеры по сравнению с другими двухмерными кодами, что все в совокупности является неоспоримым преимуществом перед существующими аналогами.

ОЦЕНКА ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ СЛИТКОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1570 ДАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ EBSD-ИССЛЕДОВАНИЯ

П. Л. Резник*, О. А. Чикова, Б. В. Овсянников
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Проведено изучение кристаллического строения образцов алюминиевого сплава 1570 на основе системы Al-Mg-Mn с добавками скандия методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD). В работе проведена оценка обрабатываемости слитков алюминиевого сплава 1570 давлением на основе данных EBSD-исследования.

The crystal structure of 1570 aluminum alloy based on the Al-Mg-Mn system with additions scandium was investigated by means of electron backscatter diffraction. In this paper, assessed the workability pressure ingots of aluminum alloy Al-Mg-Sc 1570 based on EBSD study.

Алюминиевый сплав 1570 относится к промышленным деформируемым неупрочняемым сплавам средней прочности системы Al-Mg-Mn. По технологическим свойствам в металлургическом производстве сплав 1570 близок к АМг6, из него могут изготавливаться те же полуфабрикаты, что и из сплава АМг6, но с более высокими прочностными характеристиками, коррозионной стойкостью и более хорошей свариваемостью [1].

Алюминиевый сплав 1570 по уровню прочностных, пластических характеристик, сопротивляемости образованию и распространению трещин при статистических и циклических нагрузках в большинстве случаев превосходит многие алюминиевые сплавы. Принимая также во внимание, что коррозионная стойкость и свариваемость рассматриваемого сплава довольно высоки, перспективность его применения в авиационной промышленности очевидна. В самолетостроении основными предметами внимания являются уменьшение веса и увеличение долговечности используемых в самолете деталей, поэтому повышение прочности материалов играет важную роль в обеспечении надежной работы изделий. Повышение служебных свойств возможно за счет формирования в металлах определенной микроструктуры и свойств прежде всего за счет термообработки. Совершенствование технологии производства изделий из сплава 1570 требует априорной оценки обрабатываемости слитков давлением.

В данной работе в качестве материала исследования использовали слитки алюминиевого сплава 1570 (химический состав в табл. 1).

Таблица 1

Химический состав сплавов АМг6 и 1570

Марка сплава	Химические элементы, мас. %									
	Al	Mg	Mn	Zn	Cu	Fe	Si	Sc	Zr	Ti
АМг6	осн.	6,4	0,6	0,1	0,15	0,3	0,2	-	-	0,05
1570	осн.	6,0	0,47	0,06	0,03	0,13	0,05	0,22	0,07	0,02

Проводилась температурно-временная обработка слитков 1570 при 530 °С в течение 8 ч. Проведено изучение кристаллического строения образцов, отобранных от данного слитка, методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) с помощью рабочей электронно-микроскопической станции Auriga GrossBeam. Получили карты ориентации кристаллитов (рис. 1), гистограммы дезориентации кристаллитов (рис. 2), а также по результатам анализа дифракционных картин Кикучи построили карты фактора Тейлора для определения степени однородности деформации (рис. 3).

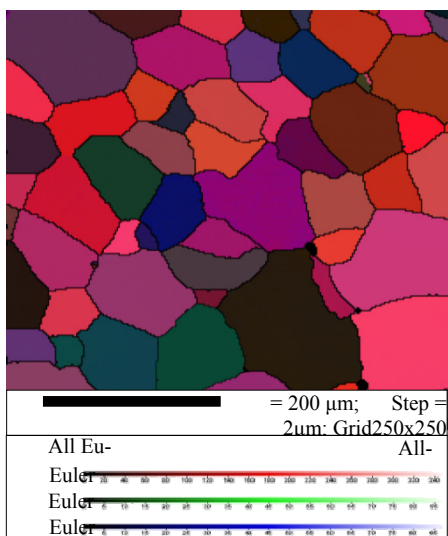


Рис. 1. Карты ориентации кристаллитов α – Al

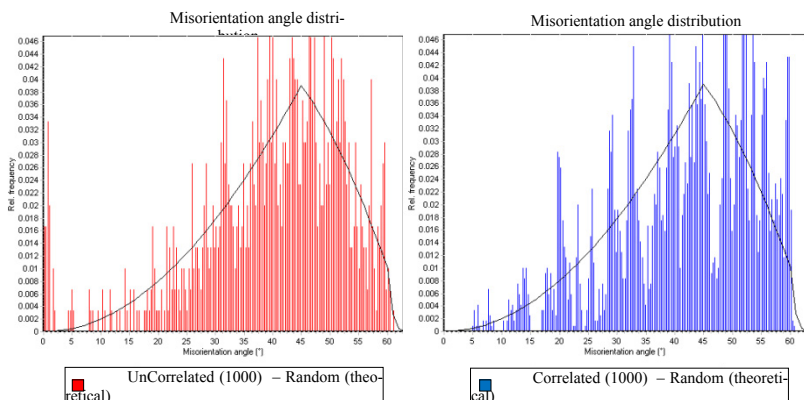


Рис. 2. Гистограмма дезориентации кристаллов α – Al

Коррелированные разориентации отражают данные разориентации между соседними точками, некоррелированные показывают разориентации между случайно выбранными точками в наборе данных. Теоретическая кривая показывает, что можно было бы ожидать от случайного набора ориентаций. Мы видим, что коррелированные (синий цвет) и некоррелированные (красный цвет) разориентации сильно отличаются от теоретической кривой и друг друга. Разница между некоррелированными разориентациями и теоретической кривой возникает в основном за счет сильной текстуры. Текстура сильно выражена. Таким образом, для металла слитка после ТВО по режиму 530 °C в течение 8 ч практически все границы малоугловые, высокая текстурированность материала.

Согласно [2] у кубических кристаллов с ГЦК-типом решетки, таких как α – Al имеет место только деформация сдвига. По результатам анализа дифракционных картин Кикучи построены карты фактора Тейлора для системы деформаций (системы скольжения), характерной для алюминия : $\{111\}\langle -111 \rangle$ при направлении нагружения параллельно оси (OX) (рис. 3). При наличии внешней нагрузки деформации начнут развиваться в темных зернах и постепенно переходить на светлые. Карты фактора Тейлора для системы деформаций $\{111\}\langle -111 \rangle$ позволяет определить степень однородности деформации. Фактор Тейлора можно рассматривать как величину обратную более известному в русскоязычной литературе фактору Шмидта. Как известно, приложенное механическое напряжение σ и напряжение сдвига в системе скольжения τ связаны соотношением $\tau = m\sigma$, где $m = \cos\lambda \cdot \cos\chi$ – фактор Шмидта (фактор ориентировки), λ – угол

между направлением скольжения и осью деформации; χ – угол между нормалью к плоскости скольжения и осью деформации. Максимальное значение фактора Шмидта, очевидно, равно 0,5 при $\lambda = \chi = \pi/4$. Гистограмма фактора Тейлора имеет два практически одинаковых пика, что свидетельствует о высокой деформационной однородности слитка.

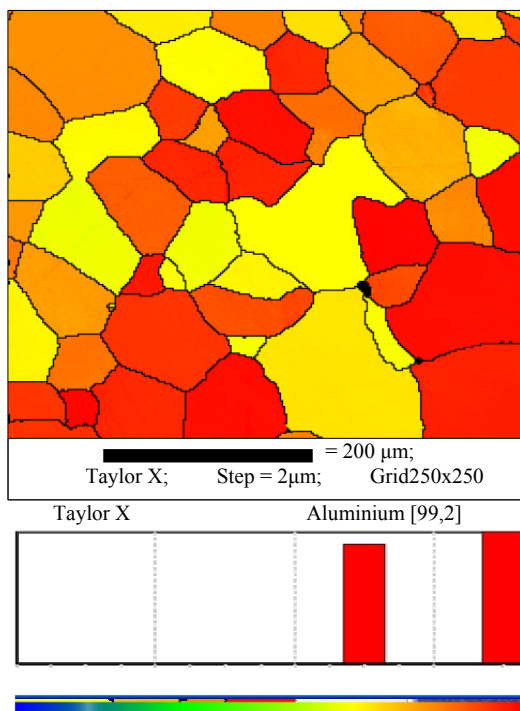


Рис. 3. Карта фактора Тейлора для системы деформации $\{111\} \leftarrow -111 \rangle$, направление нагружения параллельно оси OX

Элементный состав тела зерна, состав интерметаллидов, декорирующих границы зерен, слитка 1570 представлены в табл. 2. В микроструктуре слитка (рис. 4) по границам зерен присутствуют кристаллы интерметаллидов Al_3Mg_2 , $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$, $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$.

Проведены механические испытания образцов, отобранных от слитков 1570, полученных без ТВО и при ТВО (табл. 2).

Таблица 2

Параметры микроструктуры слитков 1570

Режим ТВО	Элементный состав тела зерна, вес. %	Интерметаллиды, локализованные по границам зерен	Относительное удлинение, % $T=410\text{ }^{\circ}\text{C}$
Без ТВО	Al-6%Mg-0,48%Mn-0,2%Sc	Al_3Mg_2 , $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$, $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$	24
530 °C, 8 ч.	Al-6%Mg-0,4%Mn-0,2%Sc-0,1%Zr	$\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$, $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$	62

Измеряли температурные зависимости прочности, условного предела текучести и пластичности при повышенных температурах 340–470 °C. Анализ результатов измерений представлен в табл. 3.

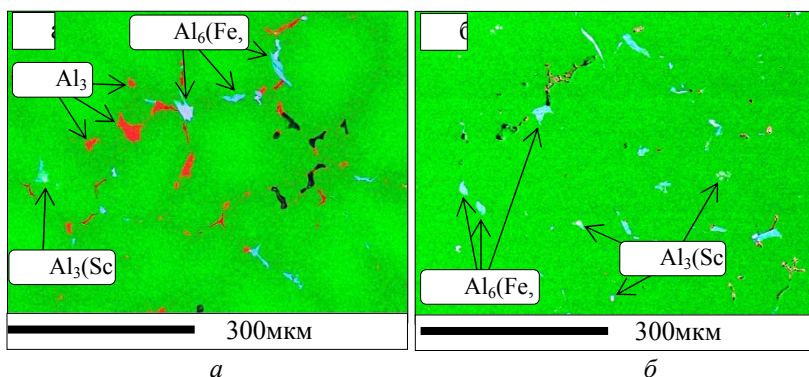


Рис. 4. Микроструктура слитка алюминиевого сплава 1570:
а – без ТВО; б – после ТВО 530 °C, 8 ч

Таблица 3

Результаты механических испытаний сплава 1570

Режим ТВО	Уменьшение прочности, %	Уменьшение текучести, %	Увеличение относительного удлинения, %	Увеличение относительного сужения, %
Без ТВО	77	77	5	31
530 °C, 8 ч	72	73	14	23

Исследованы слитки алюминиевого сплава 1570. В условиях ОАО «КУМЗ» проводилась температурно-временная обработка слитков с целью повышения прочности при сохранении хорошей пластичности

в области повышенных температур. В работе впервые проведена оценка обрабатываемости слитков алюминиевого сплава 1570 давлением на основе данных EBSD-исследования.

1. *Елагин В. И.* Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. № 9. С. 3–11.

2. *Хантингтон Г.* Упругие постоянные кристаллов // *Успехи физических наук*. 1961. Т. 74, вып. 2. С. 303–520.

ПРОГНОЗ ЛИКВАЦИИ УГЛЕРОДА В СЛИТКАХ

А. Н. Ромашкин, И. А. Иванов, А. Н. Мальгинов

АО НПО «ЦНИИТМАШ», Москва

Проведено обобщение имеющихся в литературе экспериментальных данных о химической неоднородности кузнечных стальных слитков различной массы из стали различного состава. Получено уравнение для расчета коэффициента ликвации углерода по сечению слитков в зависимости от их массы и конфигурации (отношения H/D), а также от исходного содержания углерода в разливаемой стали.

The experimental results of chemical heterogeneity of steel ingots have been generalized. Ingots with different masses and various compositions were studied. The equation for carbon segregation coefficient along the ingots according to their weight and configuration (H/D), and initial content of carbon in cast steel was deduced.

Введение

Углерод является важнейшим элементом, определяющим структуру и свойства стали. Изменение содержания этого элемента оказывает значимое влияние практически на все: на механические (прочность, пластичность), технологические (свариваемость, обрабатываемость давлением и резанием) и эксплуатационные (износостойкость, коррозионная стойкость под напряжением) свойства стали.

Однако высокая ликвационная способность этого элемента обуславливает значительную неоднородность его распределения в кузнечных слитках, что, в свою очередь, приводит к соответствующему разбросу свойств металла конечных изделий.

Поэтому прогнозирование концентраций этого элемента в различных зонах заготовки, особенно в осевых, выходящих на внутреннюю поверхность полых осесимметричных изделий, получаемых методом прошивки, является актуальным вопросом металлургии машиностроения.

В данной работе предпринята попытка разработки такого метода прогнозирования на основании обобщения имеющихся в литературе данных о распределении углерода по сечению стальных кузнечных слитков различной массы из стали различных марок.

Обобщение имеющихся экспериментальных данных о химической неоднородности стальных кузнечных слитков массой от 0,5 до 650 т (рис. 1, таблица) показывает, что в осевом направлении в общем случае концентрация углерода сначала уменьшается до высоты примерно $(0,2 \dots 0,4) \cdot H$, в зависимости от размеров кюмпеля, затем монотонно воз-

растает (рис 1). При этом разница между минимальным и максимальным содержанием рассматриваемого элемента увеличивается с ростом массы слитка достигая 150 % отн. (относительно исходного содержания) для слитков массой более 100 т.

При удалении от оси слитка неоднородность распределения углерода уменьшается, хотя общий характер изменения остается постоянным (рис. 2).

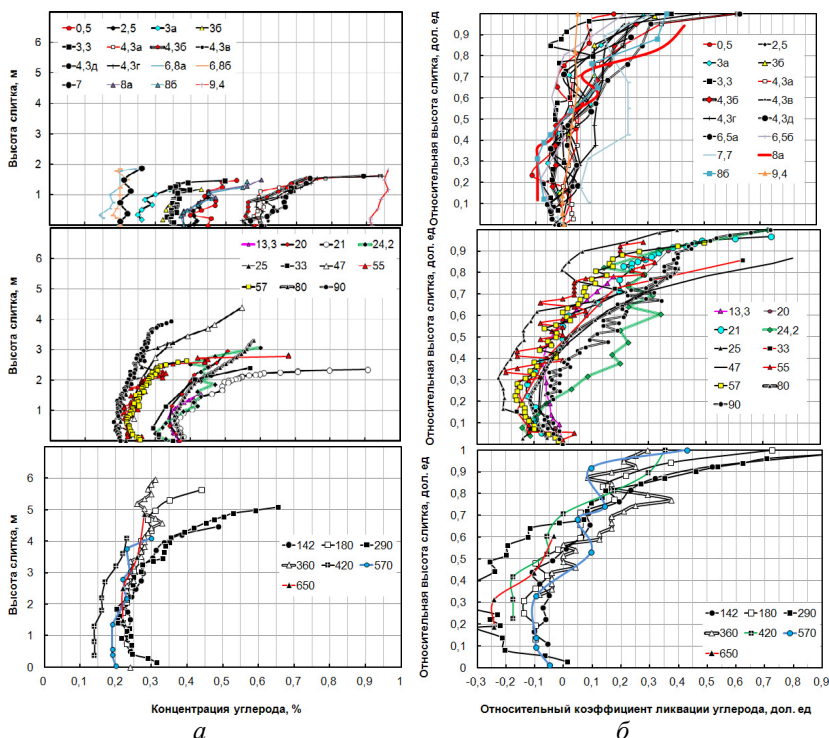


Рис. 1. Изменение содержания углерода по высоте осевой части слитков малого (верхний ряд), среднего (средний ряд) и крупного (нижний ряд) развесов в абсолютных (а) и относительных (б) координатах; информация по исследованным слиткам представлена в таблице.

В радиальном направлении содержание углерода от периферии к центру уменьшается в донной части; по-разному ведет себя в среднем сечении (в зависимости от геометрии слитка и состава разливаемой стали) и существенно возрастает в подприбыльном сечении; при этом содержание примеси в приповерхностных слоях слитка, как

поверхность

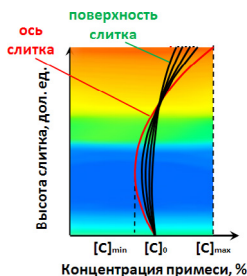


Рис. 2. Распределение ликвата по высоте слитка на различном удалении от оси

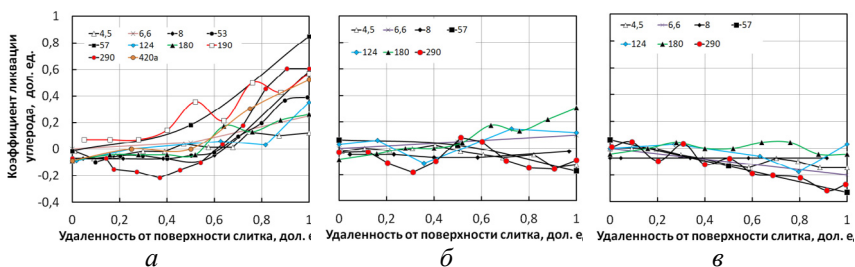


Рис. 3. Изменение коэффициента ликвации углерода по радиусу слитков различной массы в подприбыльном (*a*), среднем (*б*) и придонном сечениях (*в*); информация по исследованным слиткам представлена в таблице

Характеристика исследованных стальных кузнечных слитков

$G, \text{т}$	Марка стали	$[C]/[S]/[P], \%$	$\begin{matrix} H_K \\ H_T \\ H_{II}, \text{М} \end{matrix}$	$\begin{matrix} D_{K1}; D_{K2} \\ D_{T1}; D_{T2} \\ D_{II1}; D_{II2}, \text{М} \end{matrix}$	$H_{II}, \text{ед.}$	$K, \%$	Источ-ник	Год
0,5	Fe-0,45%С	0,35/0,01/0,01	0,00 0,65 0,15	0,00;0,00 0,28;0,36 0,30;0,32	2,0	12,0	[6]	2010
2,5	Fe-0,45%С	0,41/0,02/0,02	0,00 1,38 0,30	0,00;0,00 0,43;0,48 0,48;0,40	3,1	4,0	[7, 8]	1926
3,0а*	н.д.	0,27/0,02/0,02	н.д.	н.д.	2,6	2,0	ХХ**	н.д.
3,0б	н.д.	0,33/0,02/0,02	н.д.	н.д.	2,6	8,0	ХХ	н.д.
3,3	Fe-0,36%С	0,36/0,02/0,02	0,10 1,30 0,60	0,10;0,10 0,53;0,68 0,53;0,53	2,3	10,7	[9]	2009

G, т	Марка стали	[C]/[S]/[P], %	H _к H _г H _ц , М	D _{к1} ; D _{к2} D _{г1} ; D _{г2} D _{ц1} ; D _{ц2} , М	H _Д , ед.	К, %	Источник	Год
4,3а	У7	0,58/0,02/0,04	0,00 1,50 0,30	0,00;0,00 0,50;0,65 0,65;0,30	2,6	10	[13]	1984
4,3б	У7	0,58/0,02/0,04	то же	то же	2,8	2,0	[13]	1984
4,3в	У7	0,61/0,02/0,04	то же	то же	2,8	2,0	[13]	1984
4,3г	У7	0,60/0,02/0,04	то же	то же	2,8	2,0	[13]	1984
4,3д	У7	0,58/0,02/0,04	то же	то же	2,8	2,0	[13]	1984
4,5	Сталь 35	0,41/0,02/0,02	н.д.	н.д.	2,1	н.д.	[20]	2010
5,0а	Fe-0,49%С	0,49/0,02/0,02	0,00 1,20 0,45	0,00;0,00 0,65;0,80 0,80;0,75	1,7	12,5	[14]	2011
5,0б	Fe-0,49%С	0,49/0,02/0,02	то же	то же	1,7	12,5	[14]	2011
6,5а	30ХГТ	0,21/0,02/0,02	0,39 1,48 0,35	н.д.	2,5	18,0	[15]	1989
6,5б	20К	0,23/0,02/0,02	то же	н.д.	2,5	18,0	[15]	1989
6,6	сталь 20	0,20/0,02/0,02	0,19 2,07 0,35	0,32;0,61 0,61;0,79 0,66;0,61	3,0	8,5	[11, 12]	2007
6,8а	Ст20	0,19/0,02/0,02	н.д.	н.д.	2,6	6,0	[22]	1969
6,8б	Ст20	0,20/0,02/0,02	н.д.	н.д.	2,6	6,0	[22]	1969
7,7	Ст35	0,35/0,02/0,02	0,25 1,40 0,66	0,52;0,63 0,83;0,89 0,75;0,69	1,63	4,5	[16]	1984
8,0а	Ст45	0,42/0,02/0,02	0,10 1,67 0,56	0,61;0,74 0,84;0,87 0,82;0,63	2,0	2,4	[16]	1983
8,0б	Ст45	0,41/0,02/0,02	то же	то же	2,0	2,4	[16]	1983
8,0	40А	0,41/0,02/0,02	0,34 0,68 0,50	0,50;0,70 1,19;1,32 1,25;0,60	0,54	18,0	[10]	1958
9,4	9Х2МФ	0,92/0,012/0,01	0,30 1,16 0,62	0,30;0,73 0,73;0,87 0,82;0,65	2,0	2,0	[17]	1988
13,3	34ХН3М А	0,36/0,02/0,02	0,25; 2,02 0,57	н.д.;н.д. 0,84;0,96 н.д.;н.д.	2,3	6,0	XX	
20	н.д.	0,37/0,02/0,02	н.д.	н.д.	2,1	4,0	[18]	1959
21	AISI 4142	0,41/0,035/0,012	0,00 2,13 0,42	0,00;0,00; 0,70;0,97 0,97;0,99	2,6	15,0	[19]	1999

G, т	Марка стали	[C]/[S]/[P], %	H _к H _г H _ц , М	D _{к1} ; D _{к2} D _{г1} ; D _{г2} D _{ц1} ; D _{ц2} , М	HУД, ед.	К, %	Источник	Год
24,2	38ХН3М ФА	0,38/0,02/0,02	0,18 2,18 0,67	0,58;0,10 1,15;1,24 1,17;1,06	1,8	4,1	[20]	2010
25	Fe- 0,44%С	0,44/0,02/0,02	0,40 2,60 1,50	0,36;0,70 1,00;1,10 0,80;0,75	2,5	3,8	[21, 8]	1926
33	35ХН3М ФА	0,35/0,02/0,02	0,45 2,75 0,40	0,60;1,10 1,26;1,45 1,21;1,16	2,0	7,0	XX	н.д.
47	н.д.	0,26/0,02/0,02	н.д.	н.д.	1,3	5,0	[14]	1959
53	Fe- 0,41%С	0,41/0,02/0,02	0,60 2,90 1,34	1,12;1,34 1,50;1,70 1,60;1,60	1,8	6,9	[9]	2012
55	25Х2НМ ФА	0,25/0,02/0,02	0,30 2,40 1,00	0,50;1,00 1,42;1,84 1,70;1,16	1,5	17,6	XX	1950
57	25Х2НМ ФА	0,26/0,02/0,02	0,50 2,00 1,80	0,80;1,50 1,78;2,04 1,90;1,60	1,0	13,0	XX	1951
80	35ХНМ	0,40/0,02/0,02	0,51 3,33 1,16	0,69;1,63 1,73;1,83 1,77;1,54	1,9	3,0	XX	1952
90	S355J2G 3	0,20/0,02/0,02	0,62 1,54 0,51	0,32;1,32 1,89;2,11 1,89;1,89	1,5	7,3	[23, 24]	2012
124	35ХНМ ФА	0,36/0,01/0,01	0,60 4,10 1,50	1,00;1,90 1,90;2,03 2,03;1,70	2,1	3,1	XX	1976
142	25ХН3М ФА	0,25/0,02/0,02	1,70 2,57 1,95	0,75;2,10 2,40;2,81 2,65;1,60	1,0	16,3	XX	1976
180	5NiCrM oV	0,26/0,02/0,02	0,47 4,10 1,37	0,41;1,68 2,17;2,65 2,43;2,43	1,7	12,0	[25]	1997
190	2.25Cr- 1Mo	0,14/0,02/0,02	0,50 4,40 1,36	0,42;1,70 2,28;2,40 2,54;2,54	1,9	2,8	[25]	1997
290	25Х	0,31/0,02/0,02	1,70 3,23 2,42	1,10;2,72 2,98;3,42 3,40;2,10	1,0	13,6	XX	1983
360	25ХН3М ФА	0,20/0,02/0,02	1,81 4,28	1,10; 2,72 2,98;3,42	1,3	10,3	XX	1985

G, т	Марка стали	[C]/[S]/[P], %	H _к H _г H _ш , М	D _{к1} ; D _{к2} D _{г1} ; D _{г2} D _{ш1} ; D _{ш2} , М	H _Д , ед.	К, %	Источник	Год
			2,42	3,40;2,10				
420	15X2HM ФА	0,15/0,02/0,02	1,94 4,03 2,88	1,2; 2,75 3,19;3,59 3,4;2,35	1,2	10,0	XX	2013
420a	3.0NiCr MoV	0,23/0,02/0,02	0,63 5,45 1,74	0,55;2,22 2,88;3,50 3,23;3,23	1,70	11,4	[25]	1997
570	FeNiCr Mo	0,21/0,02/0,02	0,31 4,72 1,93	1,34;2,59 3,69;4,52 3,73;3,34	1,1	17,5	[26]	1985
670	типа 25XНЗМ ФА	0,29/0,02/0,02	н.д.	н.д.	1.2	н.д.	[27]	2011

* Буквенные индексы у некоторых слитков одинаковой массы приведены для их идентификации.

** Данные ОАО НПО «ЦНИИТМАШ».

Некоторые представления о причинах подобного С-образного распределения углерода и других ликватов по сечению слитков представлены в работах [1, 2, 3].

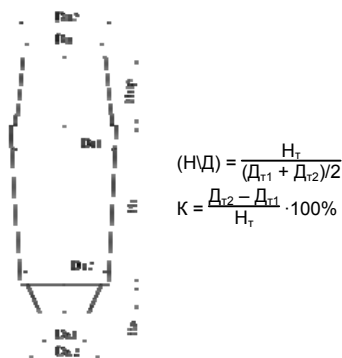


Рис. 4. Схема исследованных слитков

Статистическая обработка имеющихся в литературе данных о распределении углерода в осевом и радиальном направлении по сечению стальных кузнечных слитков позволила вывести уравнение (1) зависимости коэффициента ликвации углерода по сечению слитков от всех исследованных факторов: координаты по сечению слитка, его массы

и конфигурации слитка (характеризуемой параметром H/D), а от содержания углерода в разливаемой стали.

$$K_C = a \cdot \exp\{b \cdot (H/D) + c \cdot R\} \cdot (k_1 \cdot H + k_2 \cdot H^2), \quad (1)$$

где k_C – относительный коэффициент ликвации углерода, дол. ед ($k_C = ([C] - [C]_0)/[C]_0$);

(H/D) – отношение высоты тела слитка к его среднему диаметру, дол. ед.;

H – относительная высота слитка, дол. ед. (учитывается высота тела и кюмпеля слитка);

R – удаленность от оси слитка, дол. ед.;

a , b и c – постоянные коэффициенты, равные $-0,4654$, $0,1675$ и $1,7788$ соответственно;

k_1 и k_2 – коэффициенты, зависящие от массы слитка и содержания углерода в разливаемой стали в соответствии с уравнениями (2) и (3).

$$k_1 = -3,80 \cdot 10^{-1} + 1,74 \cdot 10^{-1} \cdot [C] + 1,88 \cdot 10^{-4} \cdot G - 8,54 \cdot 10^{-3} \cdot [C] \cdot G \quad (2)$$

$$k_2 = 5,19 \cdot 10^{-1} + 1,33 \cdot 10^{-2} \cdot [C] - 2,88 \cdot 10^{-4} \cdot G + 1,08 \cdot 10^{-2} \cdot [C] \cdot G \quad (3)$$

где G – масса слитка, т;

$[C]$ – содержание углерода в разливаемой стали, %.

Результаты расчета по полученному уравнению (1) приведены на рис. 6 и рис. 7. Представленные на данных рисунках графики наглядно иллюстрируют возрастание химической неоднородности слитка как при увеличении его массы, так и при увеличении исходного содержания углерода в разливаемой стали.

Количественный анализ полученного уравнения, показывает, что каждые 0,25 % C в разливаемой стали сопоставимы по степени влияния на коэффициент ликвации данного элемента по сечению слитка с увеличением массы последнего на 150 т, т. е. слиток массой 100 т из стали с 0,4 % C имеет примерно такую же химическую неоднородность (характеризуемую коэффициентом ликвации углерода по высоте осевой части слитка), как слиток массой 250 т из стали с 0,15 % C.

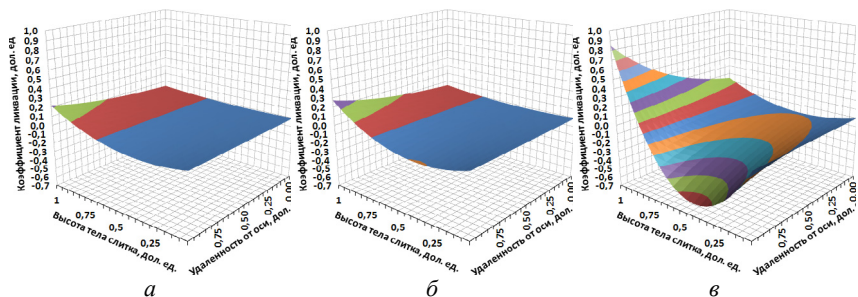


Рис. 5. Результаты расчета по (1) изменения коэффициента ликвации углерода сечению слитков массой 10 (а); 100 (б) и 1000 т (в) при $[C] = 0,30 \%$ и $H/D = 2$

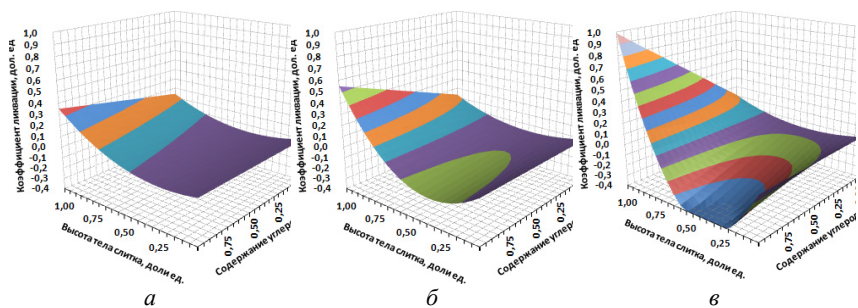


Рис. 6. Изменение kC по высоте осевой части слитка в зависимости от исходного содержания углерода: а – слиток массой 10 т; б – слиток массой 100 т; в – слиток массой 300 т; расчет по (1)

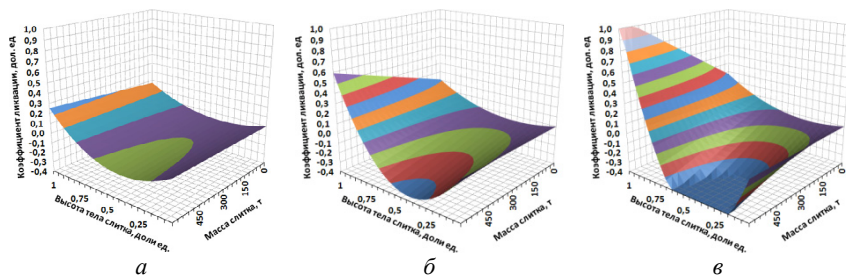


Рис. 7. Изменение kC по высоте осевой части слитка в зависимости от массы слитка: а – $[C]_0 = 0,1 \%$; б – $[C]_0 = 0,3 \%$; в – $[C]_0 = 0,6 \%$; расчет по (1)

Влияние H/D и удаленности от поверхности на значение коэффициента ликвации углерода носит экспоненциальный характер.

Уравнение применимо при содержании углерода от 0,01 до 1,0 %, при массе слитка от 1 до 1000 т; при конусности тела слитка от 0 до 17 % и при соотношении высоты тела к его среднему диаметру от 0,5 до 3,0.

В работе [36] было предложено аналогичное уравнение (4), также предназначенное для расчета коэффициента ликвации углерода, но только по высоте осевой части слитков. Пояснение к используемым в формуле (4) величинам представлено на (рис. 4).

$$\lg(k_C + 1) = -0,00175 \cdot Q \cdot \lg[h \cdot (H_T + H_{пр})] + \lg(1 - 0,0008 \cdot Q), \quad (4)$$

где h – удаленность от верха слитка до анализируемой точки по оси слитка, м;

$H_T + H_{пр}$ – суммарная высота тела и прибыли слитка (рис. 4);

Источники ссылки не найден.), м;

Q – коэффициент, зависящий от размеров слитка и содержания легирующих элементов в соответствии с уравнением (5).

$$Q = D_{m2}^2 \cdot (10 \cdot (H/D) + 30 \cdot [Si] + 800 \cdot [S] + 200 \cdot [P] - 4 \cdot [Mo] - 7 \cdot [V]), \quad (5)$$

где D_{m2} – верхний диаметр тела слитка, м (рис. 4);

$[Si]$, $[S]$, $[P]$, $[Mr]$, $[V]$ – концентрация кремния, серы, фосфора, молибдена и ванадия в разливаемой стали, %.

Сравнение выражений (1) и (4) показывает, что в обоих случаях коэффициент ликвации углерода зависит от параметра (H/D), однако если в уравнении (1) этот параметр снижает неоднородность распределения углерода, то в выражении (4), наоборот, увеличивает. В уравнении (4) размеры слитка учитываются не массой, как в уравнении (1), а линейными параметрами ($H_T + H_{пр}$) и D_{T2} (рис. 4). Также в уравнении (4) фигурирует концентрация элементов, влияющих на ликвацию углерода: кремния, серы и фосфора – как увеличивающих неоднородность его распределения, и молибдена, и ванадия – наоборот, как понижающих ликвацию углерода. Причем влияние серы сопоставимо с влиянием H/D и в определенных случаях (например, при $H/D = 1$ и $[S] = 0,02$ %) превышает его.

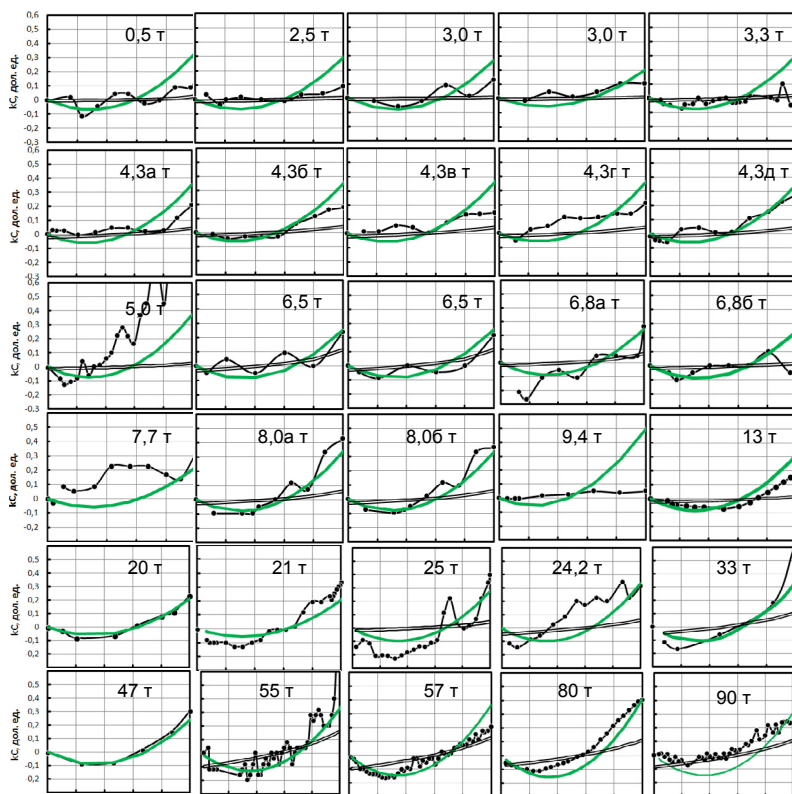
Учет влияния данных элементов логичен, однако он не был учтен в данной работе ввиду недостатка соответствующей количественной информации.

Обращает на себя внимание тот факт, что в уравнении (4) не учтено влияние углерода.

Анализ уравнения (4) также показывает, что оно не позволяет учесть возможность образования локальных пиков на концентрационных кривых и, соответственно, рассчитываемые по данному уравнению значения k_C монотонно увеличиваются по высоте слитка снизу вверх.

Кроме того, уравнение (4), в отличие от (1), не позволяет оценить изменение концентрации углерода в зоне отрицательной ликвации.

Сопоставление результатов расчета по уравнениям (1) и (4) с описанными выше экспериментальными данными работ [5...27] (рис. 1 и рис. 3) о распределении углерода по высоте осевой части и по радиусу слитков представлено на рис. 8 и рис. 9 соответственно.



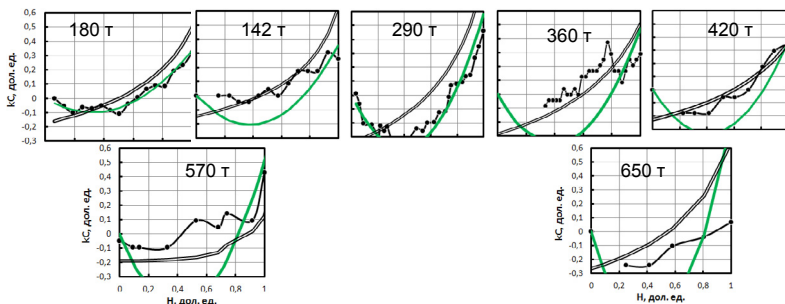


Рис. 8. Сравнение результатов расчета по уравнению (1) (серая линия) и по уравнению (4) (двойная линия) kC по высоте осевой части слитков различной массы с экспериментальными данными (темная линия с маркерами)

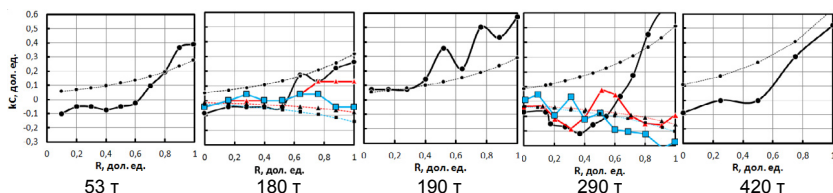


Рис. 9. Сравнение результатов расчета kC по (1) (пунктирные линии) по радиусу слитков различной массы с экспериментальными данными (сплошные линии) в подприбыльном (\bullet ; $H = 1,0$), среднем (\blacktriangle ; $H = 0,5$) и придонном (\blacksquare ; $H = 0,1$) сечениях

При расчете по (4) принимали, что $[Si] = 0,3 \%$; $[Mo]$ и $[V] = 0,0 \%$, а $[S]$ и $[P]$ задавали в соответствии с фактическими данными в соответствии с указанными в таблице значениями. Для некоторых слитков расчет по (4) не произведен ввиду отсутствия необходимой информации о размерах слитков.

Как видно, расчет по (1) позволяет получить более точный прогноз, несмотря на то, что не учитывает ряд влияющих на ликвацию углерода факторов.

Заключение

Обобщение уже имеющихся в открытой печати данных о химической неоднородности кузнечных слитков позволило вывести регрессионную формулу зависимости коэффициента ликвации углерода от высоты и радиуса слитка, его массы и конфигурации (значения НУД) и исходного содержания рассматриваемого элемента в разливаемой стали.

Применение подобного уравнения позволяет критически оценить ту или иную конфигурацию слитка на предмет его возможной химической однородности и сделать выбор в пользу оптимальной для заданного изделия геометрии.

На основании расчета по выведенному в работе уравнению показано, что каждые 0,25 % С в разливаемой стали сопоставимы по степени влияния на коэффициент ликвации данного элемента по сечению слитка с увеличением массы слитка на 150 т, т.е. слиток массой 100 т из стали с 0,4 % С имеет примерно такую же химическую неоднородность (характеризуемую коэффициентом ликвации углерода по высоте осевой части слитка), как слиток массой 250 т из стали с 0,15 % С.

Уравнение применимо при содержании углерода от 0,01 до 1,0 %, при массе слитка от 1 до 1000 т; при конусности тела слитка от 0 до 17 % и при соотношении высоты тела к его среднему диаметру от 0,5 до 3,0.

-
1. Дуб В. С., Ромашкин А. Н., Мальгинов А. Н. и др. Влияние геометрии слитка на его химическую неоднородность. Ч. 1 // *Металлург.* 2013. № 10. С. 25–33.
 2. Дуб В. С., Ромашкин А. Н., Мальгинов А. Н. и др. Влияние геометрии слитка на его химическую неоднородность. Ч. 2 // *Металлург.* 2013. № 12. С. 19–26.
 3. Дуб В. С., Ромашкин А. Н., Мальгинов А. Н. и др. // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* 2014. № 1. С. 5–19.
 4. Дуб В. С., Ромашкин А. Н., Макарычева Е. В. и др. // *Тяжелое машиностроение.* 2012. № 7. С. 13...20.
 5. Burton J. A., Prim R. C., Clichter W. P. // *J. Chem. Phys.* 1955. Vol. 33. P. 723.
 6. Sang B., Kang X., Li D. // *J. of Materials Processing Technology.* 2010. Vol. 210. P. 703–711.
 7. Li K., Wu M., Ludwig A. et al. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2010. Vol. 33.
 8. Report on the heterogeneity of steel ingots // *J. Iron Steel Institute.* 1926. Vol. 103. P. 151.
 9. Combeau H., Zaloznik M., Hans S. et al. // *Metall. Mater. Trans.* 2009. Vol. 40B. June. P. 289–304.
 10. Мадянов А. М. // *Сб. тр. 2-го совещания по теории литейных процессов.* М., 1958. С. 397–412.
 11. Фоменко А. П. // Автореф. дис.... канд. техн. наук. М., 2007. 22 с.

12. *Мозговой А. В.* Оптимизация параметров стального слитка с улучшенными характеристиками осевой зоны для сортового проката большого диаметра: Автореф. дис.... канд. техн. наук. М., 2009. 22 с.
13. *Зигало И. Н., Просвирин К. С., Малиночка Я. Н. и др.* // Сталь. 1984. № 8. С. 27–32.
14. *Liu D., Kang X., Sang B. et al.* // Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.). 2011. Vol. 24, Nr 1. February P. 54–64.
15. *Кукса А. В.* Чугунные сталеразливочные изложницы. М., 1989. С. 146.
16. *Сенопальников В. М., Лубенец Г. А., Сивков В. Л.* Управление процессами затвердевания слитка спокойной стали. Нижний Новгород, 2009. 128 с.
17. *Солодовников В. Д.* Совершенствование технологии выплавки, вакуумирования разливки стали для валков холодной прокатки : дис.... канд. техн. наук. М., 1988. 169 с.
18. *Onodera S., Arakida Y.* Effect of gravity on macrosegregation of larger steel ingots // Indian construction news. 1959. August. P. 358–368.
19. *Gu J. P., Beckermann C.* // Metallurgical and materials transactions. 1999. Vol. 30A. May. P. 1357–1366.
20. *Руцкий Д. В., Зюбан Н. А., Гаманюк С. Б.* // Изв. Самар. науч. центра РАН, 2010. Т. 12, № 1 (2). С. 489–492.
21. *Wu M., Li J., Kharicha A. et al.* // Proceedings of the 2013 symposium on liquid metal processing and casting. P. 171–180.
22. *Петухов Б. Г.* // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 1969. № 1. С. 35–38
23. *Machovcaka P., Oplera A., Tkadleckovab M. et al.* // 1st international conference on ingot casting, rolling and forging. 2012. 6 June. Brüssel-Saal. P. 1–8.
24. *Tkadleckova M., Machovcak P., Gryc K. et al.* // Materials and technology. 2012. Vol. 46, Nr 4. P. 399–402.
25. *Nishiguchi K., Nakanishi K., Nakayama K. et al.* // 13th international forgemasters meeting. Pusan, Korea, 2001. 12–16 Oct. P. 57–70.
26. *Makichi Tateno* // Frans. iron and steel inst. Japan. 1985. Vol. 25, Nr 2. P. 97–108.
27. *Ikeda Y., Morinaka K., Muraoka T.* // 18th international forgemasters meeting. Pittsburgh, USA. 2011. 12–15 Sept. P. 166–169.
28. *Дуб В. С.* // Дис.... д-ра техн. наук. М., 1980. Т. 1, 2.
29. *Назаратин В. В., Ромашкин А. Н., Иванов И. А., Мальгинов А. Н.* // Металлургия машиностроения. 2010. № 3. С. 40–52.

30. *Дурынин В. А., Солнцев Ю. П.* Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса изделий из крупных поковок ответственного назначения. СПб., 2006. 272 с.
31. *Шелухина Ю. М.* Исследование внеосевой ликвационной неоднородности в крупных кузнечных слитках и поковках : автореф. дис.... канд. техн. наук / ВолгГТУ. Волгоград, 2009. 20 с.
32. *Колодкин М. В., Ромашкин А. Н., Мальгинов А. Н.* // Тяжелое машиностроение. 2010. № 6. С. 24–28.
33. *Колодкин М. В., Жульев С. И., Дуб В. С. и др.* // Электрометаллургия. 2009. № 8. С. 26–29.
34. *Мадянов А. М.* // Сб. Тр. 2-го совещания по теории литейных процессов. М., 1958. С. 397–412.
35. *Марков О. Е.* // Металл и литье Украины. 2012. № 8 (231). С. 12–16.
36. *Ikedo Yasuto, Morinaka Koji, Muraoka Tomohiro.* Recent Technological Progress on Large Ingots for Rotor Forgings // IFM. 2011. P. 166–169.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЕ ДЕФЕКТОВ В ЛИТОМ МЕТАЛЛЕ УДЛИНЕННЫХ СДВОЕННЫХ СЛИТКОВ ИЗ Cr-Ni-Mo СТАЛЕЙ

Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан

Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград

В работе приведены особенности строения удлиненных сдвоенных прибыльных слитков, для получения которых не требуется изготовления дополнительной оснастки. Применение сдвоенных слитков приводит к увеличению площади внутренней поверхности изложниц, что позволяет снизить развитие химической неоднородности литого металла, при этом физическая неоднородность имеет незначительное развитие по шине и располагается в верхней полуформе слитка, что делает их пригодными для получения полых поковок. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 15-08-08098\15.

The paper reports findings in the structure of elongated two-piece hot-top ingots which do not require additional casting rigging. Two-piece ingots have an increased mould internal surface thus preventing the development of the chemical heterogeneity of the poured metal. In addition, transverse physical heterogeneity does not develop either and is located in the upper half of the ingot which facilitates the fabrication of hollow forgings. The study was supported by research Project RFFI No. HK 15-08-08098\15.

Интенсивное развитие сталеплавильного производства требует высокоскоростных технологий получения заготовок, чему в большой степени отвечает непрерывная разливка стали.

Замещение слитков непрерывнолитой заготовкой значительно сократило их долю в общей структуре сталеплавильного производства, и их изготовление связано в основном с получением поковок различной массы для нужд энергетического машиностроения и других отраслей.

По своим качественным характеристикам непрерывнолитая заготовка благодаря небольшому сечению и интенсивному внешнему охлаждению имеет меньшую пораженность литого металла дефектами ликвационного и усадочного происхождения по сравнению с традиционными слитками.

Однако несмотря на снижение доли производства слитков в общем балансе металлургической продукции, за последнее время существенно повысились требования к качеству слитков при многократном увеличе-

нии их массы, которая к настоящему времени достигает 300–700 т. Это обусловлено увеличением единичной мощности машин и аппаратов в тяжелой промышленности, судостроении, энергетике, химической промышленности и других отраслях. Затвердевание больших масс металла происходит длительное время (1–7 суток) и, вследствие избирательности процесса, сопровождается значительным развитием ликвационных явлений. Естественная усадка расплава, равная 4 % затвердевающего объема, обеспечивает развитие усадочных дефектов в слитках большой массы. Активное применение внепечных методов рафинирования жидкого металла и вакуумной разливки позволяет в настоящее время получать слитки требуемого качества [1–5]. На большинстве предприятий [6–9] вектор развития производства кузнечных слитков направлен на освоение затратных технологических процессов (ЭШП, ЭШО, ПЭШО и т. д.). Применение этих процессов позволяет значительно повысить качество получаемого металла. При этом использование переплавных процессов значительно повышает энергозатраты второго передела, что не обеспечивает высокой конкурентоспособности получаемых заготовок на мировом рынке металлов.

При большом многообразии имеющихся типов слитков (табл. 1) предприятие, как правило, не использует всю их гамму, а обходится каким-то одним типом, что связано с ограничениями мощности имеющегося на предприятии кузнечно-прессового оборудования. При использовании слитков различного типа различное развитие получают дефекты усадочного и ликвационного происхождения.

Таблица 1

Параметры и дефекты кузнечных слитков

Тип слитка	H/D	Объем прибыли, %	Химическая неоднородность	Физическая неоднородность	Виды поковок
Укороченные	< 1,5	25–28	Сильно развиты все виды ликвации	Отсутствует	Все виды поковок
Обычные	1,5–2,5	16–24	Развиты все виды ликвации	Развиты все виды неоднородности	Все виды поковок
Удлиненные	> 2,5	12	Развита в меньшей степени	Сильно развита	Полые поковки

В работах [7, 8, 10], представлены данные по разработке геометрических параметров укороченных и обычных слитков, позволяющие получать металл с минимальным развитием дефектов усадочного происхождения.

дения, что способствует повышению качества металла крупногабаритных поковок тяжелого и атомного машиностроения.

Для получения удлиненных слитков высокого качества к освоению предлагаются новые кузнечные слитки, для получения которых используется имеющийся на заводах парк изложниц.

Для длинномерных полых гладких и ступенчатых деталей предлагается использовать сдвоенные слитки, отливаемые в составные из двух полуформ изложницы (рис. 1) [11–13].

Геометрические параметры и размеры литейной оснастки представлены в табл. 2 и рис. 1.

Таблица 2

Геометрические характеристики и технологические параметры отливки удлиненного сдвоенного прибыльного слитка

Тип слитка	Масса, т	Высота, мм	H/D	Конусность, %	Объем прибыли, %	Продолжительность отливки	
						тело, мин.	прибыль, мин.
Сдвоенный ступенчатый с меньшей нижней частью	4,07	2970	3,8	6,1	8,3	4,5	1,0
Сдвоенный постоянного сечения	2,99	1960	3,9	6,1	10,3	3,5	1,0'

Был получен сдвоенный удлиненный и ступенчатый слитки с прямой и обратной конусностью соответственно верхней и нижней части. Слитки отливались в состоящие из двух полуформ изложницы (рис. 1). Нижней и верхней полуформами удлиненного сдвоенного слитка являлись изложницы от слитка массой 1,7, а ступенчатого 1,7 и 2,88 т соответственно.

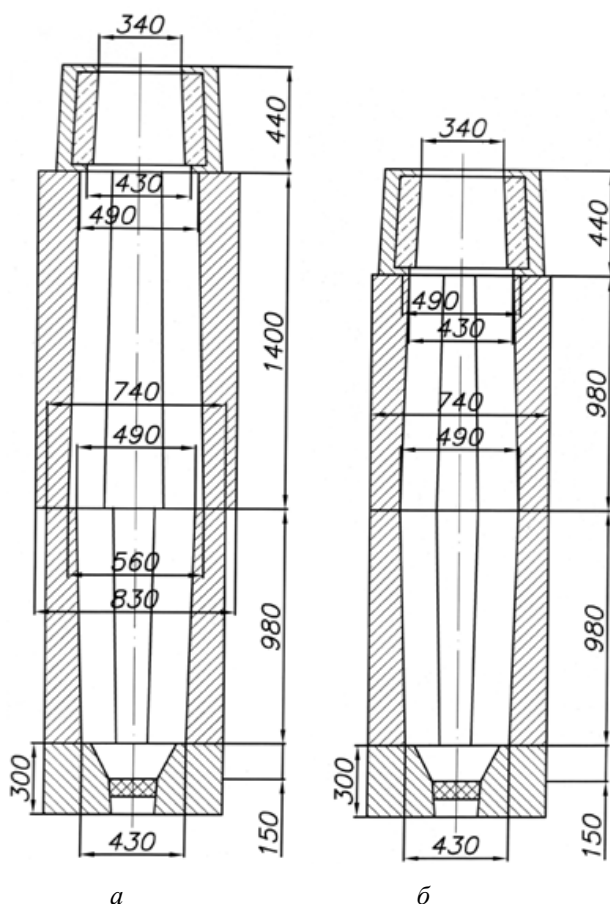


Рис. 1. Геометрические характеристики сдвоенных слитков:

а – сдвоенный прибыльный ступенчатый слиток

с меньшей нижней частью 4,07 т;

б – сдвоенный прибыльный слиток

постоянного сечения массой 2,99 т

Результаты исследования структуры слитков и макротемплеты, представлены на рис. 2.

Наблюдается существенное различие в параметрах основных структурных зон обычного и сдвоенных слитков.

Конус осаждения в обычном слитке заметно больше, чем в сдвоенных, и составляет 43 % от общей высоты слитка, тогда как в сдвоенном 16 и 8 % в ступенчатом.

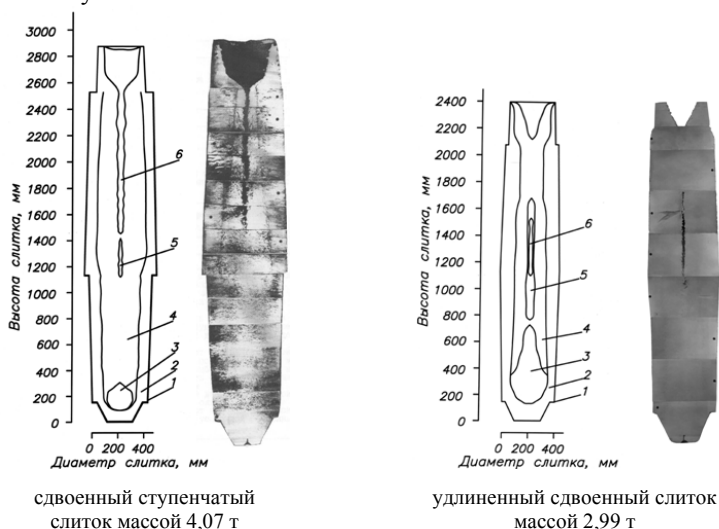


Рис. 2. Строение удлиненных сдвоенных слитков:

1 – корковая зона; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – конус осаждения; 4 – зона различно ориентированных кристаллов; 5 – зона осевой рыхлости; 6 – вторичная усадочная раковина; 7 – усадочная раковина

В обоих сдвоенных слитках наблюдается протяженная усадочная раковина в верхней части тела слитка, которой нет в обычном слитке. Однако сдвоенные слитки предназначены для получения полых поковок и развитая усадочная раковина гарантированно удаляется в выдру при прошивке слитка или высверливается.

Для сдвоенных слитков важен такой параметр, как максимальный диаметр осевой дефектной зоны, который у сдвоенного ступенчатого слитка равен 10 % от ширины слитка, что меньше чем в удлиненном сдвоенном на 3 %. Основное преимущество сдвоенного ступенчатого слитка перед сдвоенным слитком постоянного сечения в том, что у первого слитка усадочная раковина простирается только в верхней половине слитка. Это дает возможность использовать нижнюю половину ступенчатого слитка для производства сплошных поковок.

Ширина зоны столбчатых кристаллов в абсолютных и в относительных значениях у обычного слитка меньше, чем в сдвоенных. Это связа-

но с более высокой степенью развития зоны последовательной кристаллизации сдвоенных слитков.

Авторами в работах [11, 12, 14, 15] было проведено сравнение параметров зон ускоренного охлаждения (нулевой ликвации). Результаты исследований приведены на рис. 3 и 4.

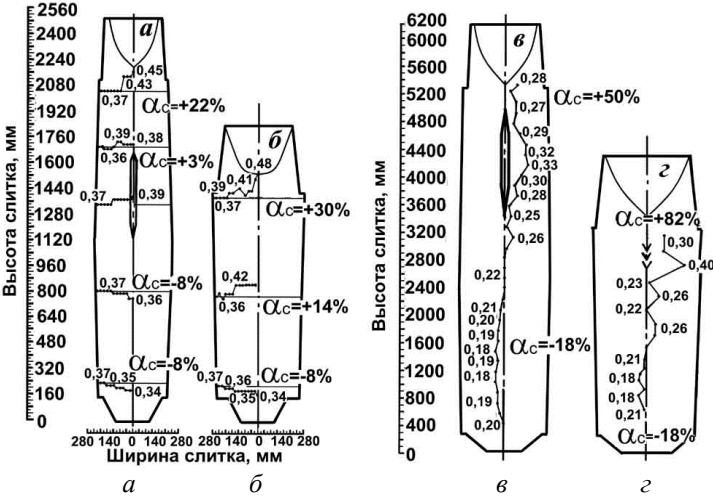


Рис. 3. Химическая неоднородность удлиненных сдвоенных и сравнительных прибыльных слитков обычной геометрии: а – слиток 2,99 т, сталь марки 38ХНЗМФА; б – слиток 2,88 т, сталь марки 38ХНЗМФА; в – слиток 50 т, сталь 20 г; г – слиток 51 т, сталь 20

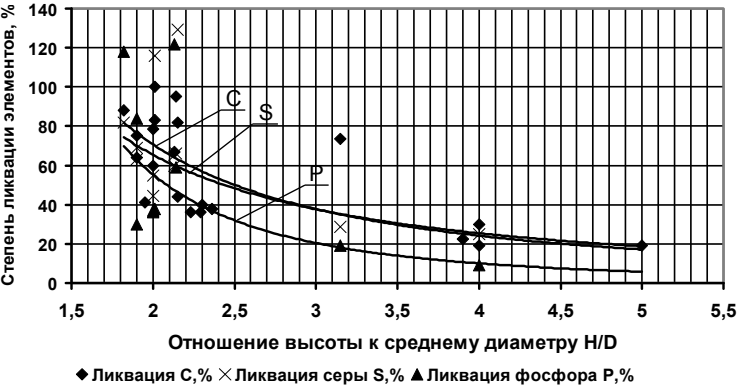


Рис. 4. Влияние геометрии слитка (H/D) на ликвацию

Сравнение показало, что в обычных прибыльных слитках массой до 2,88 т зона «нулевой» ликвации занимает около 30 % объема. В удлиненных сдвоенных слитках величина этой зоны увеличивается в 1,5 раза, она занимает около 45 % от тела слитка (табл. 3).

Таблица 3

Зоны ликвации прибыльных и сдвоенных слитков

Масса слитка, т	H/D	S _{изл} , см ²	$\frac{\Pi_{изл}^*}{M_{сл}}$, см ² /кг	Ликвация элементов, %			
				Объем зоны, %	C	S	P
Поверхностная зона слитка (интенсивного охлаждения)							
1,7	1,93	36064	21	31	0	0	0
2,88	2,5	49624	17	28	0	-	-
2,6	4	72128	28	42	0	0	0
2,99	4	72128	24	48	0	-	-
Центральная зона слитка							
1,4	1,9	-	-	73	8	12	27
1,7	1,93	-	-	69	20	25	37
2,88	2,5	-	-	72	38	-	-
2,6	4	-	-	58	13	24	9
2,99	4	-	-	52	30	-	-

* Отношение площади внутренней поверхности изложницы к массе металла.

Причиной увеличения интенсивности последовательной кристаллизации в удлиненных слитках является большее развитие площади внутренней поверхности изложницы, участвующей в непосредственном контакте с затвердевающим металлом. Расчет показал, что площадь внутренней поверхности изложниц сдвоенного слитка массой 2,99 т в 1,5 раза больше площади охлаждающей поверхности обычного прибыльного слитка массой 2,88 т. При сравнении площадей поверхности, участвующей в охлаждении 1 кг жидкой стали (см. табл. 3), видно, что в сдвоенных слитках величина ($\Pi_{изл}/M_{сл}$) примерно в 1,7 раза больше, чем в обычных прибыльных слитках. Увеличение площади поверхности, участвующей в охлаждении стали, приводит к снижению химической неоднородности примерно в 3 раза.

Сдвоенные слитки с повышенным H/D ~ 4 имеют меньшую химическую неоднородность, вызванную большим развитием поверхности литейной оснастки, участвующей в охлаждении слитка.

Выводы

Проведенными экспериментальными исследованиями по отливке слитков сдвоенной формы установлено:

1. Данная конфигурация слитков позволяет увеличить область интенсивного охлаждения, включающую две зоны – корковую и столбчатых кристаллов – в 1,5 раза, что приводит к снижению химической неоднородности металла удлиненных сдвоенных слитков с $H/D \geq 4$ в 3 раза.
2. Дефекты, вызванные проявлением усадочных процессов, получают минимальное развитие, их протяженность по ширине и диаметру делает возможным их удаление при последующих операциях металлургических переделов.
3. Применение технологии получения сдвоенных слитков не требует затрат на освоение дополнительных площадей, оборудования, материалов, что при повышении качества заготовок делает их конкурентоспособными на мировом рынке металлов.

1. Жульев С. И., Зюбан Н. А. Производство и проблемы качества кузнечного слитка : монография. Волгоград, 2003. 168 с.

2. Дюдкин Д. А., Кисиленко В. В. Производство стали. Т. 3. М., 2008. 400 с.

3. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технология современной металлургии. М., 2004. 786 с.

4. Поживанов М. А., Шахназов Е. Х., Свяжгин А. Г. Выплавка стали для автолиста. М., 2006. 166 с.

5. Ubukata Takashi, Suzuki Tadashi, Ueda Sou, and Shibata Muroran Plant Takashi Dehydrogenation in Large Ingot Casting Process, 16th IFM the. 2009 P. 52–68.

6. Tomioka Atsushi, Nishihara Michio, Nishiguch Katsushige Quality of the work roll by new ESR, 16th IFM the. 2009 P. 75–84.

7. Дуб А. В., Левков Л. Я., Шурыгин Д. А. и др. Перспективы производства оборудования для АЭС с использованием ЭШП // Вопросы атомной науки и техники. 2014. № 34. С. 11–18. (Сер. Обеспечение безопасности АЭС).

8. Дуб В. С., Ромашкин А. Н., Мальгинов А. Н. Основные тенденции развития технологии разлива стали в слитки // Металлург. 2013. № 6. С. 31–44.

9. Дуб В. С., Дуб А. В., Кригер Ю. Н. и др. Электрошлаковый переплав – способ кардинального повышения качества и свойств ответственных изделий в современном машиностроении. Технические требования и новые решения // Тяжелое машиностроение. 2012. № 6. С. 2–6.

10. Ромашкин А. Н., Мальгинов А. Н., Толстых Д. С. и др. Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нем // *Электromеталлургия*. 2013. № 7. С. 36–39.

11. Руцкий Д. В., Жульев С. И., Мозговой А. В., Титов К. Е. Повышение качества и эффективности производства крупногабаритных полых изделий // *Технология машиностроения*, 2007. № 10. С. 8–11.

12. Руцкий Д. В., Жульев С. И., Бод К. Ю. Исследование применимости сдвоенных ступенчатых слитков для производства поковок // *Технология машиностроения*. 2008. № 5. С. 7–9.

13. Зюбан Н. А., Руцкий Д. В., Гаманюк С. Б., Коновалов С. С. Кузнечные слитки: Проблемы качества и новые подходы // *Черные металлы*, 2014. № 7. С. 21.

14. Руцкий Д. В., Жульев С. И., Сивак Б. А., Шелухина Ю. М., Мозговой А. В. Стабилизация механических свойств в изделиях тяжелого машиностроения // *Тяжелое машиностроение*. 2007. № 12. С. 26–28.

15. Жульев С. И., Руцкий Д. В., Бод К. Ю. Разработка кузнечных слитков переменного сечения для получения полых ступенчатых поковок с повышенной однородностью механических свойств // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2009. № 1. С. 26–30.

АНАЛИЗ КПД АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ РАБОТЕ С ДЕФЕКТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ

Н. Р. Сафин, В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Рассмотрены вопросы влияния технического состояния подшипников на коэффициент полезного действия асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Приведены результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные работы проводились при испытаниях асинхронного двигателя в номинальном режиме с исправным подшипником и с двумя неисправными подшипниками, имеющими дефекты во внутренней и внешней частях обоей. Дефекты подшипников увеличивают потери энергии, что приводит к повышенному рассеиванию тепла в зоне контактов его элементов, перегреву и снижению КПД двигателя. Проведено тепловое обследование двигателя, представлены графические данные, характеризующие изменение температур узлов и КПД машины при работе с неисправным подшипником.

The article deals with issues of influence of bearings' technical condition on the induction efficiency motors with squirrel-cage rotor. The results of experimental research are presented. The experimental work has been carried out using the tests of the induction motor at rated nominal mode, healthy bearing and with two defective ones, which had defects of inner and outer parts of cages. The bearings defects increase the energy losses, which leads to increased heat dissipation in contact parts of its elements, overheating and reducing of motor efficiency. The thermal observation of motor are performed, graphic dates are presented, which describe the changes in temperature units and efficiency of machine with working with faulty bearing.

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором являются наиболее массовой продукцией электромашиностроения, на их долю приходится свыше половины мирового энергопотребления. Обеспечение надежности функционирования АД в промышленности является важнейшим условием их эффективной эксплуатации. Достижение этих требований в значительной мере зависит от качества работы подшипников, а именно: от их характеристик, определяющих тепловые, вибрационные, шумовые и другие эффекты, возникающие в зоне контакта механических элементов [1].

Дефекты подшипников могут обуславливать ряд явлений во вращающихся машинах: колебания, нагрев, изменение частоты вращения, повышенный шум и т. д. Можно отметить, что в этих случаях увеличиваются местные перегревы, возрастают механические потери, что в конечном счете обуславливает снижение КПД АД. Таким образом, оценка влияния неисправности подшипников на КПД АД является актуальной задачей.

Авторы работы [2] отмечают, что эксплуатация АД номинальной мощностью 2,2 кВт и $2p=2$, с неисправным подшипником обуславливает снижение КПД на 1,5 %. В работе [3], отмечается, что в подобных случаях возможно снижение КПД АД номинальной мощностью 0,75 кВт и $2p=2$, в пределах 1,6–2,4 %. Авторы работы [4] отмечают, что неисправности подшипников в насосных установках в которых используются АД с номинальной мощностью 650 кВт и номинальной скоростью вращения 1485 об/мин могут обуславливать повышение энергопотребления до 14 %. При этом КПД всей системы насосной установки может снижаться до 18 %. После проведенного обзора можно отметить, что вопросы исследования влияния неисправностей подшипников на КПД АД рассматривались в недостаточном объеме. В отмеченных публикациях не приводятся исследования влияния неисправности подшипника на КПД в зависимости от времени работы машины. Для рассмотрения этих вопросов были проведены испытания АД при работе с различными подшипниками и проанализированы полученные данные.

Экспериментальная часть

При испытаниях АД питался непосредственно от трехфазной сети, испытания проводились на стенде, в котором тормозящий момент создавался индукционным динамометром. В процессе экспериментов выполнялись тепловизионные снимки с помощью тепловизора Testo 875-2i. Запись значений токов и напряжений выполнялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (USB3000) с частотой дискретизации 50 кГц и измерительной платы с тремя датчиками токов LEMHX 02-P и тремя датчиками напряжений LV25-PSP5. Скорость вращения испытуемого АД регистрировалась с помощью фототахометра «Mastech DT-2234A». Момент на валу АД задавался равным номинальному $M_H = 2,5 \text{ Н*м}$. Мгновенные значения токов и напряжений оцифровывались АЦП и записывались на компьютер для обработки в пакете Matlab. Испытания АД, проведенные поочередно с каждым подшипником, представляли собой ряд стадий с длительностью: 2 мин., 15 мин., 30 мин., 60 мин. и 120 мин. По окончании каждой стадии выполнялось снятие термограмм, регистрация мгновенных значений токов

и напряжений. При этом испытания АД с каждым подшипником проводились после охлаждения машины до исходной температуры окружающей среды. В качестве испытуемой машины был использован АД с номинальной мощностью 0,75 кВт и номинальной скоростью вращения 2820 об/мин., в котором используются подшипники марки 6204 (рис. 1). Испытания АД проводились с исправным подшипником; с подшипником, имеющим отверстие по внешней обойме 4 мм (неисправный № 1); с подшипником, имеющим отверстие по внешней обойме 6 мм (неисправный № 2). В двух последних случаях также имелись небольшие выемки во внутренних обоймах. Применяемые способы искусственного получения дефекта для исследования режимов работы АД с поврежденными подшипниками описаны в [5].



Рис. 1. Подшипники (слева-направо): а) исправный, неисправные № 2 и 1; б) неисправные № 2 и 1 вид сбоку

Тепловизионное обследование позволяет визуально оценивать механические дефекты и распределение температуры АД непосредственно в процессе эксплуатации. Наличие участка с избыточной температурой свидетельствует о развитии дефекта.

Результаты экспериментов

В качестве примера (рис. 2–3), приведены термограммы АД, после 15 мин. работы. Максимальная температура при тепловом воздействии соответствует внутренней обойме подшипников. Подшипники закрыты щитами и с внешней стороны расположены уплотнения, т. е. армированные манжеты. Как правило, резиновые манжеты с пружиной предназначены для уплотнения валов, защиты от попадания пыли и грязи, могут эксплуатироваться при температурах от -60°C до 170°C . Соответственно на приведенных термограммах максимальная температура соответствует уплотнению АД (манжет с пружиной).

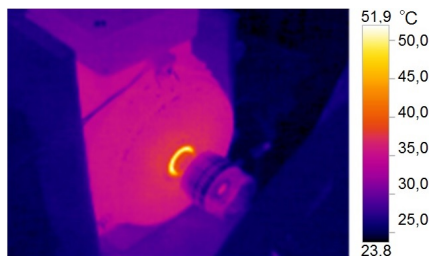


Рис. 2. Термограмма работы АД с исправным подшипником
(время испытаний 15 мин.)

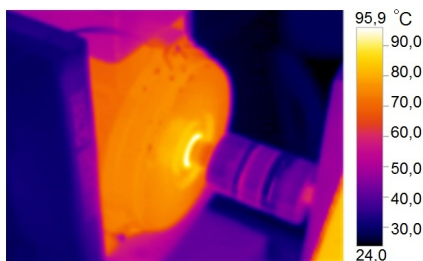


Рис. 3. Термограмма работы АД с неисправным подшипником № 1
(время испытаний 15 мин.)

Испытуемая машина с определенным подшипником эксплуатировалась непрерывно. С увеличением периода эксплуатации с неисправным подшипником происходит возрастание тепловых потерь в зоне подшипникового узла, что обуславливает рост температуры и снижение КПД. Номинальная рабочая температура используемых подшипников 6204 составляет от - 20 °C до 120 °C. Далее приведены термограммы (рис. 4–5), полученные при итоговых испытаниях АД длительностью 120 мин., с экспериментальными подшипниками.

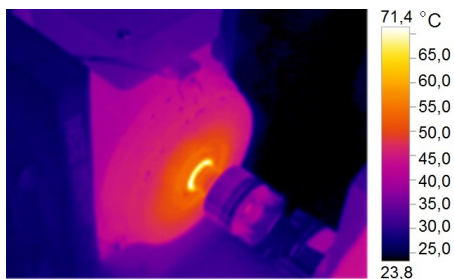


Рис. 4. Термограмма работы АД с исправным подшипником
(время испытаний 120 мин.)

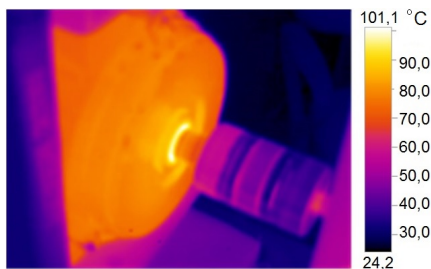


Рис. 5. Термограмма работы с неисправным подшипником № 1
(время испытаний 120 мин.)

Тепловизионное обследование, при котором измеряются температура и область с повышенной температурой, позволяет оценить мощность выделений в дефекте [7]. Исходя из полученных данных (табл. 1–3), видно, что разница между температурой на корпусе машины и температурой окружающей среды (т. е. относительное отклонение температуры) становится значительно выше при работе АД с механическими дефектами. Происходит повышенное рассеивание тепла.

Таблица 1

Температурные значения (при работе 30 мин.)

АД с исправным подшипником		Относительное отклонение температуры, $T_{\text{frame. temp}} - T_{\text{amb. temp}}, ^\circ\text{C}$
Температура окружающей среды, $T_{\text{amb. temp}}, ^\circ\text{C}$	24,8	14,2
Температура на корпусе машины, $T_{\text{frame. temp}}, ^\circ\text{C}$	39	
АД с неисправным подшипником № 1		45,6
Температура окружающей среды, $T_{\text{amb. temp}}, ^\circ\text{C}$	24,9	
Температура на корпусе машины, $T_{\text{frame. temp}}, ^\circ\text{C}$	70,5	
АД с неисправным подшипником № 2		46,7
Температура окружающей среды, $T_{\text{amb. temp}}, ^\circ\text{C}$	24,8	
Температура на корпусе машины, $T_{\text{frame. temp}}, ^\circ\text{C}$	71,5	

Таблица 2

Температурные значения (при работе 60 мин.)

АД с исправным подшипником		Относительное отклонение температуры, $T_{frame, temp} - T_{amb, temp}, ^\circ C$
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ C$	24,5	18,7
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ C$	43,2	
АД с неисправным подшипником № 1		51,8
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ C$	24,4	
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ C$	76,2	
АД с неисправным подшипником № 2		52
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ C$	24,5	
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ C$	76,5	

Таблица 3

Температурные значения (при работе 120 мин.)

АД с исправным подшипником		Относительное отклонение температуры, $T_{frame, temp} - T_{amb, temp}, ^\circ C$
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ C$	23,8	19,7
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ C$	43,5	
АД с неисправным подшипником № 1		53,8
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ C$	24,2	
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ C$	78,0	
АД с неисправным подшипником № 2		54,5
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ C$	24,0	
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ C$	78,5	

В проведенных экспериментах не проводились точные измерения уровня электрических сопротивлений на каждом этапе испытаний, поэтому оценивать измерение температуры обмотки методом сопротивле-

ний неприемлемо. Выделяемая мощность дефекта может рассматриваться как диссипационное потребление энергии. Поэтому часть подводимой мощности будет расходоваться для активации дефекта, вследствие чего возникают нагревы, вибрации [7]. По полученным экспериментальным данным (рис. 6) заметно, что дефект подшипников обуславливает непрерывный рост температуры корпуса АД, которая является наибольшей в первые 30 мин. работы машины.

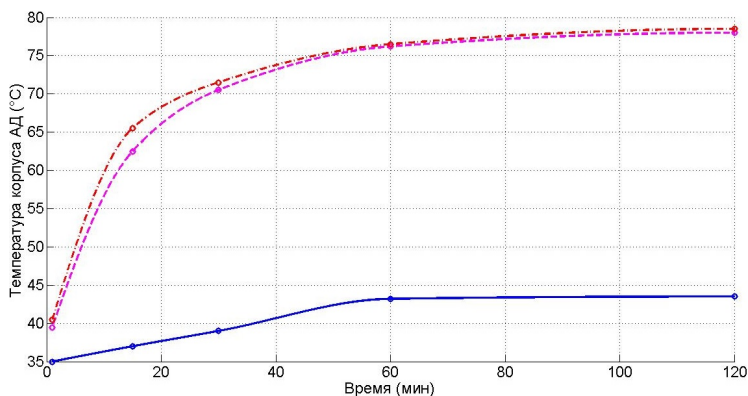


Рис. 6. Температура корпуса АД при номинальной нагрузке: АД с исправным, неисправным № 1 и неисправным № 2 подшипниками

После этого перейдем к данным (табл. 4–7), где приведены основные параметры АД в процессе испытаний. Исходя из проведенного обзора в начале работы, известно, что эксплуатация АД с неисправными подшипниками обуславливает снижение КПД. Данные замечания подтверждаются проведенными работами. Например, исходя из итоговых испытаний длительностью 120 мин. (табл. 7), можно заметить, что в данном случае снижение КПД машины находится в пределах 5,97–6,76 %.

Таблица 4

Результаты экспериментов – время работы 2 мин.

Подшипник	Исправный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Время работы, мин.	2	2	2
Номинальный ток, А	1,96	1,997	1,995
Скорость вращения ротора, об/мин	2755	2754	2725
Входная мощность, Вт	1040,22	1086,54	1079,2

Подшипник	Исправ- ный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Выходная мощность, Вт	760,4	760,12	752,12
Коэффициент мощности	0,765	0,795	0,791
КПД, %	73,1	70	69,7

Таблица 5

Результаты экспериментов – время работы 30 мин.

Подшипник	Исправ- ный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Время работы, мин.	30	30	30
Номинальный ток, А	1,965	1,999	1,996
Скорость вращения ротора, об/мин	2755	2737	2712
Входная мощность, Вт	1053,11	1096,4	1100,78
Выходная мощность, Вт	760,4	755,43	748,53
Коэффициент мощности	0,772	0,802	0,8
КПД, %	72,2	68,9	68

Таблица 6

Результаты экспериментов – время работы 60 мин.

Подшипник	Исправ- ный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Время работы, мин.	60	60	60
Номинальный ток, А	1,971	2,012	2,0
Скорость вращения ротора, об/мин	2755	2724	2706
Входная мощность, Вт	1056,1	1105,91	1104,09
Выходная мощность, Вт	760,4	751,84	746,88
Коэффициент мощности	0,778	0,803	0,808
КПД, %	72	68	67,6

Таблица 7

Результаты экспериментов – время работы 120 мин.

Подшипник	Исправ- ный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Время работы, мин.	120	120	120
Номинальный ток, А	1,979	2,003	2,011
Скорость вращения ротора, об/мин	2755	2724	2706

Подшипник	Исправ- ный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Входная мощность, Вт	1057,57	1112,19	1110,41
Выходная мощность, Вт	760,4	751,84	746,88
Коэффициент мощности	0,778	0,81	0,808
КПД, %	71,9	67,6	67,3

Далее рассмотрим следующий график (рис. 7), характеризующий КПД АД в периодах времени работы: 2 мин., 30 мин., 60 мин. и 120 мин. На приведенном графике отмечены значения КПД для каждого этапа испытаний. Можно отметить, что после работы машины в течение 120 мин. КПД АД с исправным подшипником снизился на 1,64 % по сравнению с начальным значением (после 120 мин.); КПД АД с неисправным подшипником № 1 снизился на 5,9 % по сравнению с начальным значением (после 120 мин.); КПД АД с неисправным подшипником № 2 снизился на 6,4 % по сравнению с начальным значением (после 120 мин.).

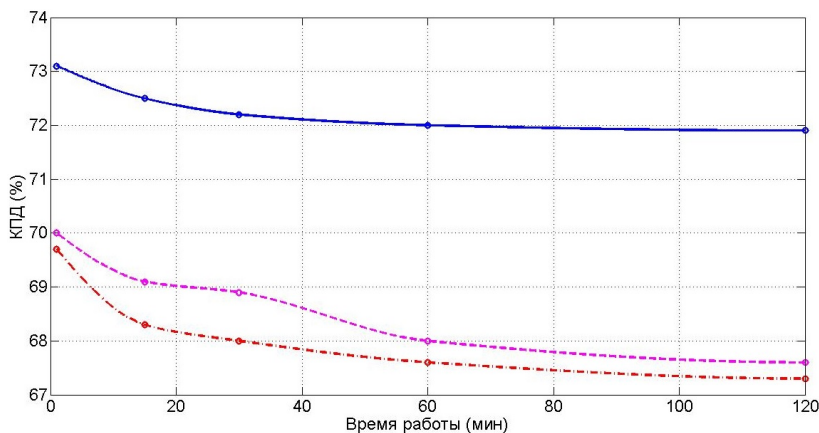


Рис. 7. КПД АД при номинальной нагрузке: АД с исправным, неисправным № 1 и неисправным № 2 подшипниками

В приведенных работах [2–3] не исследуется изменение КПД машины с неисправным подшипником с учетом длительной работы машины, т. е. при прогревом состоянии АД, что является схожим при работе двигателя в реальных условиях при длительном режиме. Следовательно, в данной работе получены уточненные данные по изменению КПД с неисправным подшипником с учетом прогретого состояния машины.

При длительном режиме снижение КПД АД после 120 мин. работ с неисправным подшипником находится в пределах 5,9–6,4 %. При длительном режиме работы АД дефект в подшипнике усиливает момент сопротивления при вращении машины. Непосредственную статическую нагрузку в процессе работы АД получают только несколько тел качений подшипника, в то время как остальные прокатываются между обоймами. При этом возникающие переменные нагрузки достигают своего максимума и минимума в верхних и нижних точках тела качения. Соответственно дефекты в обоймах подшипников со временем обуславливают переменное изменение их внутреннего радиального зазора, что приводит к флуктуациям воздушного зазора машины, при этом искажается магнитное поле АД. Приведенные факторы обуславливают снижение КПД машины.

Выводы

В данной работе получены уточненные данные по изменению КПД АД с неисправным подшипником с учетом прогретого состояния машины. Выполненные работы являются приближенными к реальным условиям эксплуатации машин. Представлены термограммы, графики и табличные значения, характеризующие изменение температур узлов и КПД машины при работе с неисправным подшипником. В дальнейших работах планируется проведение испытаний АД, находящихся в длительной эксплуатации на реальных объектах и с подшипниками, получившими износ в действительных условиях эксплуатации. При этом для оценки КПД предполагается проведение испытаний для разных типов АД по высоте оси вращения и числу пар полюсов машины.

-
1. Малафеев С. И., Копейкин А. И. Идентификация механических потерь в подшипниках электрических машин в режиме колебаний // Электротехника. 2006. № 4. С. 57–60.
 2. Frosini L., Bassi E., Gazzaniga C. Effect of the bearing faults on the efficiency of the induction motors // 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON). 2008. P. 1167–1172.
 3. Safin Nail, Prakht Vladimir, Dmitrievskii Vladimir. Bearing fault diagnostic of induction motor by stator currents analysis based on Park's vectors approach // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698. P. 83–89.
 4. Mostafa A. Abu-Zeid, Abdel-Rahman S. M. Bearing problems' effects on the dynamic performance of pumping stations // Alexandria Engineering J. 2013. Vol. 52, iss. 3. P. 241–248.

5. Obaid R. R, Habetler T.G., Stack J.R. Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors // 4th IEEE International symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives SDEMPED 2003. New Jersey, 2003. P. 182–187.
6. Baranski M., Polak A. Thermographic diagnostic of electrical machines // 19th International Conference on Electrical Machines (ICEM). Rome, 2010. P. 1–3.
7. Ярошенко И.В. Повышение эффективности функционирования высоковольтных мехатронных модулей на основе диагностики технического состояния : дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2014. 171 с.

ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НАБОРА ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В БУНКЕР БЗУ ЛОТКОВОГО ТИПА ФИЗИЧЕСКИМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

С. К. Сибгатуллин, А. С. Харченко, М. В. Потапова
Магнитогорский государственный технический университет,
Магнитогорск

На физической модели бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) лоткового типа исследовали действующие режимы односкиповой загрузки компонентов сырьевых материалов в шихтовый бункер доменной печи ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Рассмотрели влияние изменения последовательности набора материалов в бункер на равномерность их поступления в колошниковое пространство при содержании 30 % окатышей в железорудной части шихты. Выявили, что наиболее рациональным в существующих условиях является следующая последовательность набора материалов в бункер: на дно 17 % агломерата от его расхода, затем окатыши, коксовый орешек, руда и оставшееся количество агломерата.

Operating modes of the onestrip loading of raw materials components into the charge hopper of the blast furnace OJSC "MMK" were investigated on the physical model of the bell-less charging device of a gutter type. The effect of the sequence changing of a set of materials into the hopper to the uniformity of their arrival in the throat space at a content of 30% of pellets in the iron ore part of the charge was examined. It was found that the most efficient in the current circumstances is the following sequence of set materials into the hopper: on the bottom 17% of sinter from its consumption, then pellets, nut coke, ore and sinter the remaining amount.

Введение

Режим загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство печи относится к основным средствам организации хода доменного процесса. Для интенсивного протекания его с низким удельным расходом кокса необходимо обеспечивать равномерное окружное и оптимальное по радиусу колошника распределение материалов. Поскольку шихта доменных печей является многокомпонентной, в сырьевой части которой помимо агломерата и окатышей могут присутствовать кварцит, известняк, железная и марганцевая руды, коксовый орешек или коксовая фракция, возникают сложности в обеспечении равномерного окружного распределения материалов [1, 2]. Особенно они проявляются

на доменных печах, оснащенных компактным бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) лоткового типа. В связи с этим градиент температур по периферии зачастую выше, чем на печах с конусным загрузочным устройством. Такой режим может сопровождаться ухудшением показателей хода доменного процесса [3]. Расположение коксового орешка вблизи с агломератом или окатышами изменяет скорость и степень восстановления железорудных материалов [4]. Концентрация орешка в определенном секторе колошника затрудняет его расходование на реакции прямого восстановления, что приводит к снижению фильтрующей способности кокса в горне печи [5–7]. Неравномерное распределение промывочных материалов или состава сырья в целом является причиной точечного воздействия на состояние горна, неравномерности в количестве и свойствах чугуна и шлака по окружности, нарушений в движении потоков шихты и газа.

Расположение новых порций материалов на поверхности засыпи зависит от угла наклона и скорости вращения лотка, траектории движения их от лотка до поверхности ранее сформировавшегося слоя, количества и последовательности поступления компонентов из шихтового бункера по наименованиям и крупности, поведения материалов на поверхности слоя шихты после загрузки. При этом последовательность набора компонентов сырья в шихтовый бункер [1, 2, 8] относится к определяющим факторам.

Для решения задачи улучшения работы печи повышением равномерности окружного распределения шихтовых материалов лотковым загрузочным устройством необходимо дополнение и уточнение физическим моделированием результатов, полученных в вышерассмотренных работах.

Физическое моделирование

Для выявления рационального режима набора компонентов сырья в доменные печи ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) провели ряд экспериментов на лабораторной установке одно-трактового компактного загрузочного устройства лоткового типа (рис. 1). Размеры модели пропорционально уменьшены в 5 раз по отношению к линейным размерам компактных БЗУ, установленных на доменных печах объемом 1370 м³ ОАО «ММК».

Моделировали существующие на ОАО «ММК» режимы одностоповой загрузки железорудной части шихты в бункер БЗУ, содержащей следующие компоненты, %: агломерат – 70, окатыши – 30; добавки (железная руда и коксовый орешек) – 2 дополнительно к агломерату и окатышам.

В серии опытов № 1 исследовали режимы загрузки материалов «добавки на дно скипа». В опытах компоненты шихты размещали в бункере в следующей последовательности: вниз помещали агломерат, после чего коксовый орешек, окатыши, затем руду. Режим загрузки материалов «добавки наверх скипа» моделировали в серии опытов № 2. Последовательность расположения компонентов шихты была следующей: на дно бункера БЗУ помещали коксовый орешек, затем окатыши, следом руду и агломерат. В серии опытов № 3 исследовали режимы загрузки материалов в скип «вперемешку». Моделирование одного из них обеспечило следующее расположение их в бункере: на дне 25 % агломерата от общего его расхода, затем 35% окатышей от общего их расхода, после чего оставшееся количество агломерата и окатышей. Последними в бункер поступали коксовый орешек и руда. Использование модернизированного режима «добавки наверх скипа» обеспечили следующую последовательность набора материалов в бункер БЗУ: на дно 17 % агломерата от его расхода, затем окатыши, коксовый орешек, руда и оставшееся количество агломерата.

При угле открытия шихтового затвора 50 градусов производили выпуск материалов из бункера. По ходу выпуска отбирали пробы, отделяли материалы друг от друга и определяли долю каждого материала по мере их истечения.

В ходе эксперимента было соблюдено равенство критерия Ньютона для реальной печи ($Ne_{дп}$) и модели ($Ne_{м}$):

$$Ne = \frac{F \times \tau_{п}^2}{M_{п} \times L}, \quad (1)$$

где $M_{п}$ – масса, поступающей шихты из бункера БЗУ, кг;

L – расстояние, на которое перемещаются материалы, м;

$\tau_{п}$ – время, за которое происходит перемещение на расстояние L , с;

F – сила тяжести материала, Н.

Каждый эксперимент дублировали, после чего находили дисперсию каждого опыта. Затем по критерию Кохрена определяли однородность данного ряда дисперсий.

Результаты и обсуждение

Содержание материалов по видам в процессе выпуска их из бункера в серии опытов № 1 приведено на рис 2, 3. Из анализа зависимостей, приведенных на рис 2, 3, видно, что первая порция была сформирована из одного агломерата. Оставшиеся порции содержали от 50 до 70 % агломерата и от 30 до 50 % окатышей. Максимальное количество железной руды наблюдали в порциях № 2 и 3, хотя ее загружали

в бункер последней. Максимальное количество коксового орешка, размещенного в бункере после агломерата, наблюдали в конце выпуска. Это соответствует закономерностям формирования эллипсоидов выпуска и разрыхления.



Рис. 1. Физическая модель однотрактового компактного загрузочного устройства лоткового типа

Первыми шихтовый бункер покидали частицы, расположенные над выпускным отверстием, образуя воронку и эллипсоид выпуска. В остальной части бункера в движение вовлекались материалы, находящиеся в зоне эллипсоида разрыхления. Образование его позволяет компонентам с наиболее высокой плотностью и крупностью перемещаться сверху вниз интенсивнее по сравнению с остальными. Коксовый орешек может отставать.

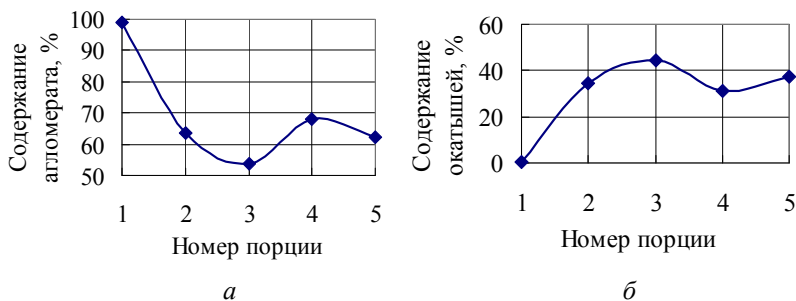


Рис. 2. Содержание агломерата (а) и окатышей (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 1

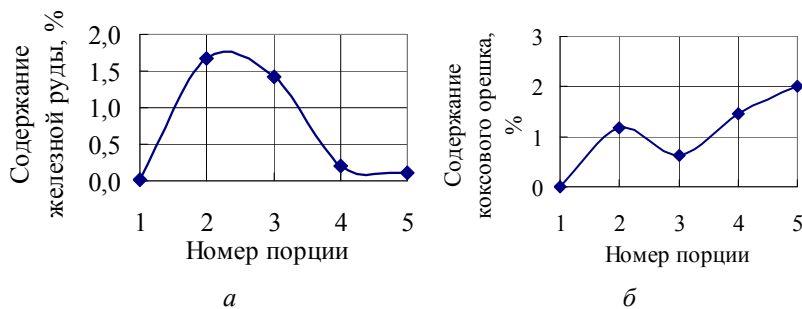


Рис. 3. Содержание железной руды (а) и коксового орешка (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 1

Такая последовательность выпуска материалов из бункера БЗУ обеспечила среднюю величину среднеквадратического отклонения содержания компонентов в порциях, отобранных по ходу выпуска, равную 9,1 % (таблица).

Среднеквадратическое отклонение содержания материалов по порциям, отобранным по ходу выпуска в серии опытов № 2, составило 19,4 % (см. таблицу), что выше аналогичной величины, полученной в серии опытов № 1. В серии опытов № 2 компоненты поступали на лоток БЗУ менее равномерно, на что указывают зависимости на рис. 4, 5.

**Среднеквадратическое отклонение содержания компонентов сырья
в порциях, отобранных по ходу выпуска**

Последовательность расположения мате- риалов в бункере БЗУ сверху вниз	Среднеквадратическое отклонение по видам материалов, %				
	Агломе- рат	Окаты- ши	Руда	Коксо- вый орешек	Средне- арифме- тическое значение
– руда – окатыши – орешек – агломерат	17,4	17	1	0,8	9,1
– агломерат – руда – окатыши – орешек	37,5	36,9	0,6	2,7	19,4
– руда – орешек – окатыши 65 % от их расхода – агломерат 75 % от его расхода – окатыши 35 % от их расхода – агломерат 25 % от его расхода	9,4	9,8	1,1	1,2	5,4
– агломерат 83 % от его расхода – руда – орешек – окатыши – агломерат 17 %	13,9	13,5	0,6	0,7	7,2

Расположение окатышей в нижней части бункера БЗУ после небольшого количества коксового орешка обеспечило высокое их содержание (более 90 %) в порции № 1. По ходу выпуска увеличивалась доля агломерата в каждой из порций и снижалась доля окатышей.

Применение на печи матрицы, предусматривающей движение лотка в направлении от периферии к центру при спиральном режиме загрузки материалов в условиях расположения неофлюсованных окатышей в нижней части бункера, может приводить к ускоренному износу футеровки печи или к ускоренной ликвидации ранее сформировавшейся

настыли. Поступление коксового орешка на лоток БЗУ в начальный момент времени при использовании матрицы загрузки, предусматривающей начало высыпания порции материалов на станцию углового положения лотка № 11 или 10 и окончание на станции № 9, не обеспечит его расположения в рудном гребне.

Содержание компонентов сырья в порциях по ходу выпуска серии опытов № 3 приведено на рис. 6, 7.

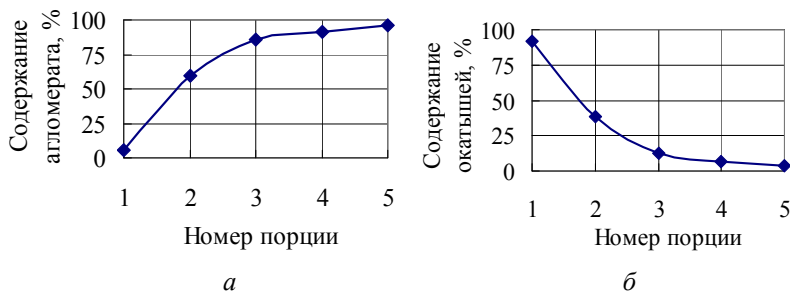


Рис. 4. Содержание агломерата (а) и окатышей (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 2

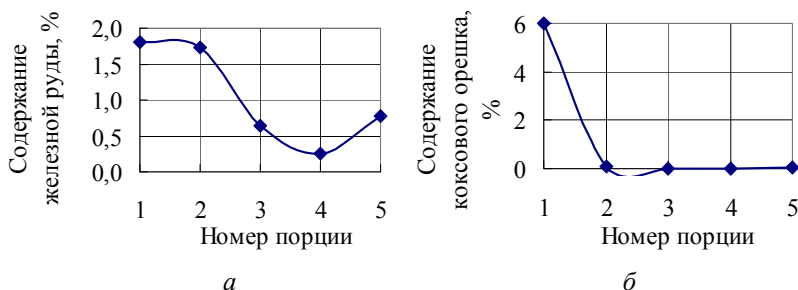


Рис. 5. Содержание железной руды (а) и коксового орешка (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 2

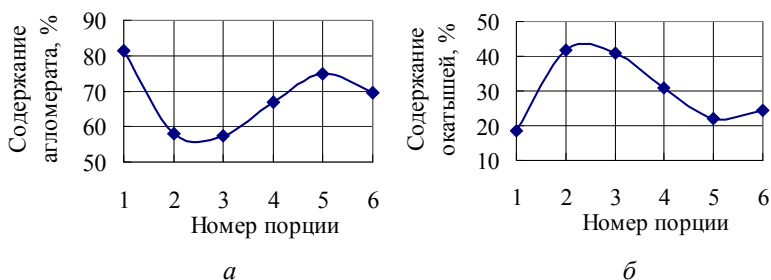


Рис. 6. Содержание агломерата (а) и окатышей (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 3

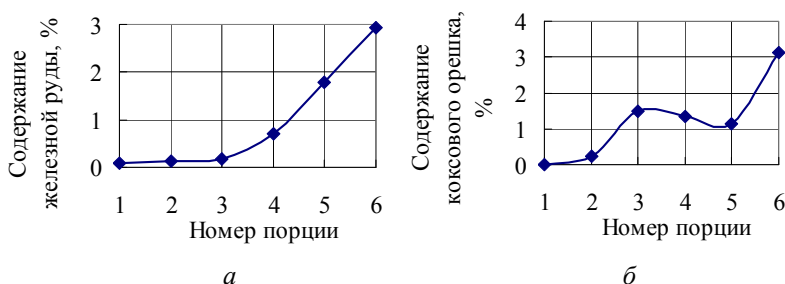


Рис. 7. Содержание железной руды (а) и коксового орешка (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 3

Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 6, 7, и данных, представленных в таблице, следует, что режим «вперемешку» обеспечивает более высокую равномерность поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи. Среднеквадратическое отклонение содержания агломерата и окатышей в порциях, отобранных по ходу выпуска, соответственно составило 9,4 и 9,8 %. Загрузка железной руды и коксового орешка в бункер последними не обеспечивает равномерное их поступление, что может отрицательно сказаться на дренажной способности кокса в горне печи. В этом случае предпочтительным будет использование следующей последовательности набора материалов в бункер БЗУ: на дно 17 % агломерата от его расхода, затем окатыши, коксовый орешек, руда и оставшееся количество агломерата. Сформировать такой слой можно использованием модернизированного режима «добавки наверх скипа». Содержание агломерата и окатышей в порциях по ходу выпуска в серии опытов № 4, соответствующей такому режиму, приведено на рис 8, 9.

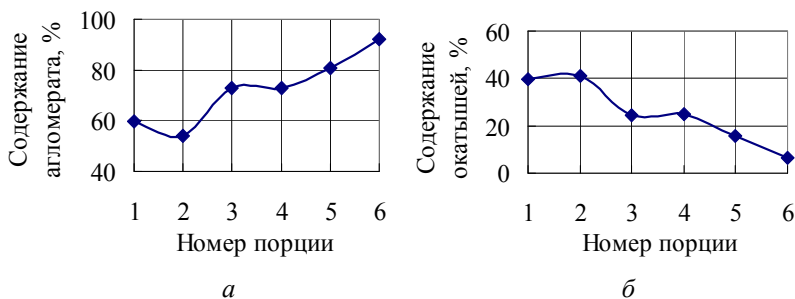


Рис. 8. Содержание агломерата (а) и окатышей (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 4

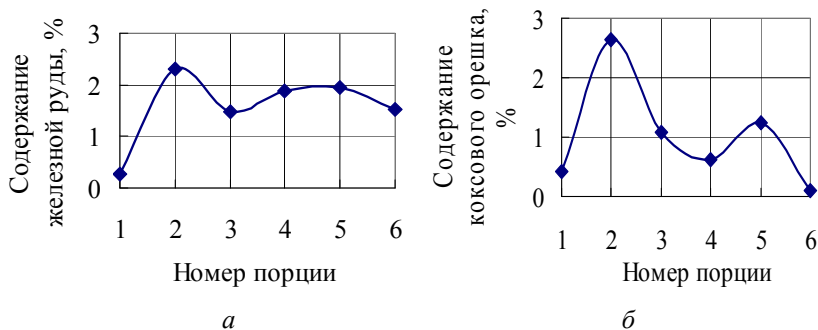


Рис. 9. Содержание железной руды (а) и коксового оreshка (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 4

Поскольку при проведении опытов было соблюдено равенство критерия Ньютона для печи и модели, то каждый один оборот вращения лотка на печи соответствует выпуску материалов в двух последующих порциях модели. При использовании матрицы, предусматривающей спиральный режим загрузки сырьевых материалов на три станции углового положения лотка, использование режима, описанного в серии опытов № 4, обеспечит повышенную равномерность распределения по видам в каждой из трех кольцевых зон колошника.

Выводы

Физическим моделированием существующих режимов односкиповой загрузки материалов в бункер бесконусного загрузочного устройства лоткового типа на модели, изготовленной в масштабе 1 : 5 по отношению к реальному устройству, выявлена рациональная последова-

тельность набора компонентов сырья в бункер при содержании в нем 30 % окатышей. Низкую величину среднеквадратического отклонения содержания каждого из компонентов в порциях по ходу выпуска обеспечивала следующая последовательность расположения их в бункере: на дно 17 % агломерата от его расхода, затем окатыши, коксовый орешек, руда и оставшееся количество агломерата. Такой режим целесообразен для улучшения использования энергии газов повышением равномерности распределения материалов по окружности колошника доменной печи.

1. Пыхтеева К. Б., Загайнов С. А., Тлеугабулов Б. С., Филиппов В. В., Журавлев Д. Л., Николаев Ф. П. Анализ особенностей формирования порций и истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке шихты // Сталь. 2008. № 6. С. 14–19.

2. Харченко А. С., Сibaгатуллин С. К., Теплых Е. О., Гуцин Д. Н. Влияние различных факторов на равномерность распределения коксового орешка в колошниковом пространстве доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа // Теория и технология металлургического производства : Межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск, 2010. № 10. С. 33–38.

3. Сibaгатуллин С. К. Оптимальная степень прямого восстановления железа из оксидов // Сталь. 1997. № 4. С. 1–5.

4. Mousa E., Senk D., Babich A. Reduction of Pellets-Nut Coke Mixture under Simulating Blast Furnace Conditions // Steel Research International. 2010. Vol. 81, iss. 9. P. 706–715.

5. Сibaгатуллин С. К., Харченко А. С., Чевычелов А. В. и др. Влияние коксового орешка на фильтрацию жидких продуктов плавки в горне доменной печи // Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. 2010. № 4. С. 28–30.

6. Сibaгатуллин С. К., Харченко А. С., Полинов А. А. и др. Результаты совместного использования в доменной печи коксового орешка с одновременным улучшением качества скипового кокса // Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. 2010. № 2. С. 24–27.

7. Онорин О. П., Спирин Н. А., Павлов А. В., Лавров В. В. и др. Логические основы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. 2014. № 8. С. 42–47.

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ШИХТЫ ДВИЖЕНИЮ ГАЗА В НИЖНЕЙ ЧАСТИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ ЕЕ РАБОТЫ С КОКСОВЫМ ОРЕШКОМ

С. К. Сибгатуллин, А. С. Харченко, М. В. Потапова
Магнитогорский государственный технический университет
им Г. И. Носова, Магнитогорск

Обработкой массива данных о стабильной работе одной из доменных печей ОАО «ММК», объемом 1370 м^3 , оснащенной бесконусным загрузочным устройством лоткового типа, создана математическая модель, основанная на использовании искусственных нейронных сетей, для прогноза коэффициента сопротивления шихты движению газов в нижней части доменной печи в условиях вовлечения в доменную плавку коксового орешка. Выполненное тестирование показало адекватность модели реальным данным. Установлено влияние ряда характеристик дутья, железорудной части шихты и качества кокса на изменение газодинамики в нижней части печи.

A mathematical model based on the use of artificial neural networks for forecast of resistance coefficient of burden to the gas at the bottom of the blast furnace with using of coke nut by processing of data array for the OJSC "MMK" blast furnaces (capacity of 1370 m^3), equipped with a chute type bell-less charging device is created. This test has shown the adequacy of the model to real data. Influence of such characteristics as blast, iron ore, coke quality change on gas dynamics at the lower part of the black furnace is determined.

Постановка проблемы

Вовлечение коксового орешки и фракции в доменное производство является одним из направлений снижения удельного расхода скипового кокса [1–3]. Наряду с положительными сторонами: наличием углерода, повышенной холодной прочностью по сравнению со скиповым коксом [4], более высокой эквивалентной по поверхности крупностью, чем у агломерата и окатышей, имеются и отрицательные. Недостаточно высокие результаты в значительной мере обусловлены большим влиянием дренажа продуктов плавки в горне печи на ее работу [1, 5, 6], газопроницаемостью слоя шихты [7, 8], степенью и скоростью восстановления железорудной части шихты [9,10]. Одной из причин негативного влияния орешка на фильтрующую способность коксовой насадки является

неравномерное его распределение по окружности колошника и отличие от оптимального размещения по радиусу. Особенно это проявляется на печах, оснащенных компактным бесконусным загрузочным устройством лоткового типа, поскольку такие агрегаты не обеспечивают равномерного окружного распределения компонентов шихты в связи с малой длительностью опорожнения бункера совместно с действием других факторов [11, 12].

В связи с этим актуальной задачей является выявление мероприятий, применение которых устранил отрицательное действие расхода орешка на фильтрующую способность горна печи.

Нейросетевое моделирование для прогнозирования газодинамических параметров в нижней части печи

Для выявления мероприятий, компенсирующих негативное влияние расхода коксового орешка на дренажную способность кокса в горне печи, нейросетевым моделированием обработали показатели работы доменной печи ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», объемом 1370 м³, оснащенной компактным бесконусным загрузочным устройством лоткового типа.

Исследовали влияние различных факторов на коэффициент сопротивления шихты в зоне, характеризуемой нижним перепадом давления газов. Для построения нейронной сети использовали характеристики дутья, железорудной части шихты и кокса:

- содержание в дутье кислорода;
- расход природного газа;
- расход пара на увлажнение;
- температуру горячего дутья;
- содержание в шихте FeO, MgO, Al₂O₃;
- основность шихты;
- содержание в агломерате фракции 0–5 мм;
- истираемость (M10), прочность на удар (M25), реакционную способность (CRI), горячую прочность (CSR) кокса;
- интенсивность по сырью.

Выходным параметром служил коэффициент сопротивления шихты в нижней части печи, вычисленный по формуле:

$$\lambda_{\text{ши}} = \frac{(2 \times P_{\text{д}} - \Delta P_{\text{н}}) \times \Delta P_{\text{н}}}{V_{\text{д}}^m}, \quad (1)$$

где $P_{\text{д}}$ – давление горячего дутья, кПа;

$\Delta P_{\text{н}}$ – нижний перепад давления газов, кПа;

$V_{\text{д}}$ – расход холодного дутья, м³/мин на 1 м³ полезного объема печи.

Обучение нейронной сети проводили на основе базы данных, в которую вошли суточные сведения о параметрах работы печи. Для обучения приняли алгоритм обратного распределения. На сеть подавали входные сигналы, которые, распространяясь по ней, обрабатывались по определенным правилам и выдавали некоторый выходной параметр. Затем он сравнивался с фактическим значением и вычислялась их разница, которая передавалась обратно от выходного к входному слою. Происходило обновление весов. Путем повторяющегося обучения на множестве фактических данных происходило последовательное приближение к оптимальным значениям весов. Конечная цель состоит в нахождении минимума функции ошибки.

В результате исследований выбрали сеть (рис. 1) с минимальными значениями ошибок.

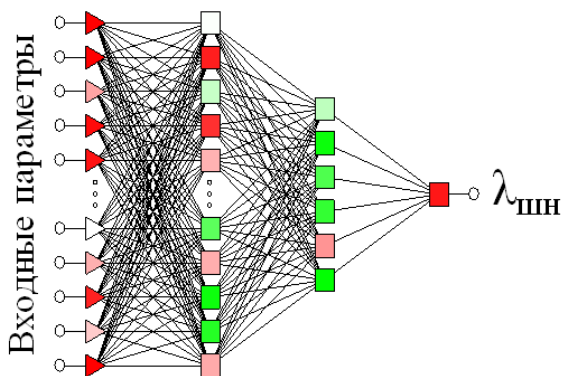


Рис. 1. Структура нейронной сети для определения коэффициента сопротивления шихты в нижней части печи

Представленная нейронная сеть построена на основе многослойного персептрона. Она состоит из четырех слоев: входной, образованный 14 нейронами; первый скрытый – 13, второй скрытый – 6 и выходной – 1 нейроном.

Тестировали модель на адекватность, используя данные, не входящие в обучающую выборку. Средняя относительная ошибка прогноза не превысила 0,28, максимальная из всей выборки – 2,82 %.

Результаты и обсуждение

Аналитическое описание результатов нейросетевого моделирования дало безразмерное уравнение следующего вида:

$$\lambda = 1,96 + 0,88D + 12,71ЖРС + 15,91K - 2,48D \cdot ЖРС + 6,57D \cdot K - 5,93 ЖРС \cdot K - 1,68D^2 - 0,3ЖРС^2 - 14,22K^2, \quad (2)$$

где D – комплексный показатель, характеризующий содержанием кислорода в дутье, его температурой, расходами природного газа и водяного пара;

$ЖРС$ – комплексный показатель, включающий расход сырья в единицу времени, содержание в нем FeO , MgO , Al_2O_3 , фракции 0–5 мм и основность;

K – комплексный показатель, включающий истираемость по М10, прочность на удар по М25, горячую прочность (CSR) и реакционную способность (CRI) кокса.

Относительная ошибка расчетных величин не превышает 3,52 %.

Действия рассматриваемых факторов на коэффициент сопротивления шихты характеризуются данными, приведенными в табл. 1.

Таким путем выявлены мероприятия, компенсирующие отрицательное действие орешка на дренажную способность коксовой насадки в горне печи.

Негативное действие коксового орешка на ход доменной плавки в количестве 4 кг/т чугуна компенсировало изменение одного из показателей качества кокса: снижение истираемости М10 на 0,05 % абс., или повышение горячей прочности CSR на 0,14 % абс.

В зависимости от условий доменной плавки было выявлено прямое и обратное влияние исследуемых параметров на коэффициент сопротивления шихты. Так, компенсирование негативного действия расхода коксового орешка на ход доменной плавки, в том числе на дренажную способность горна печи, обеспечивалось либо уменьшением расхода природного газа, либо его увеличением (рис. 2, 3).

Влияние расхода природного газа на коэффициент сопротивления шихты движению газов в нижней части печи зависело от содержания кислорода в дутье. При его концентрации менее 25,2 % увеличение расхода природного газа ухудшало газодинамические условия в нижней части печи в соответствии с рис. 2. При увеличении содержания кислорода в дутье влияние расхода природного газа на коэффициент сопротивления шихты менялось в противоположенную сторону (рис. 3).

Таблица 1

**Характеристики дутья, железорудного сырья,
кокса и степень их влияния на коэффициент сопротивления шихты
в исследуемый период**

Наименование показателей	Значение		Коэффициент
	min	max	
Содержание кислорода в дутье, %	24,3	29	1,78
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	84,5	131,9	1,20
Расход пара на увлажнение, г/м ³	0	12,2	1,08
Температура горячего дутья, °С	1103	1187	1,44
Содержание в шихте, %: FeO	7,4	10,62	1,01
MgO	1,52	1,72	1,13
Al ₂ O ₃	1,97	2,29	1,36
Основность шихты	0,93	1,09	1,04
Характеристики кокса, %: M10	8,33	9,63	1,17
M25	84,9	87	-
CRI	30,5	31,9	1,34
CSR	55,5	57,4	1,16
Содержание в агломерате фракции 0–5 мм, %	6,8	16,65	1,06
Интенсивность по железорудному сы- рью, т/(м ³ · сут)	2,95	4,43	1,10

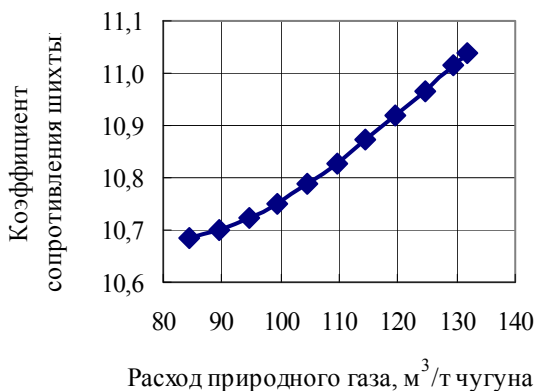


Рис. 2. Влияние расхода природного газа на коэффициент
сопротивления шихты при содержании кислорода в дутье 24,3 %

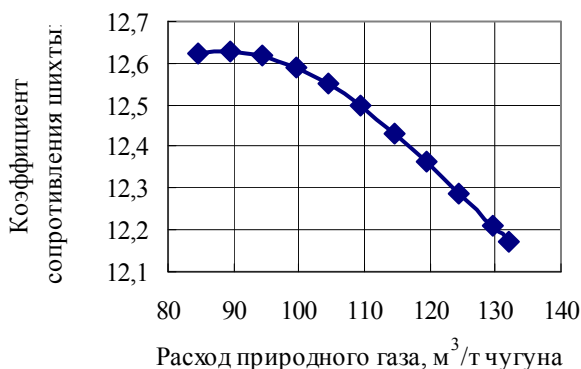


Рис. 3. Влияние расхода природного газа на коэффициент сопротивления шихты при содержании кислорода в дутье 29 %

1. Nikitin L. D., Mar'yasov M. F., Gorbachev V. P., Bugaev S. F. Blast-furnace operation with coke fines // Metallurgist. 1999. iss. 1. P. 38–39.
2. Dobroskok V. A., Lipukhin Yu. V., Kurunov I. F., Loginov V. N. Development of charging protocol and experience in using small-fraction coke in high-capacity blast furnace // Steel in Translation. 1998. iss. 1. P. 38–39.
3. Pishnograev S. N., Chevychelov A. V., Gostenin V. A., Shtafienko N. S., Gridasov V. P. Using coke fines in the blast furnaces at OAO MMK // Steel in Translation. 2009. Vol. 39, iss. 10. P. 878–881.
4. Sibagatullin S. K., Kharchenko A. S., Teplykh E. O. Quality comparison of coke nuts. Coke and chemistry. 2012. Vol. 55, iss. 2. P. 62–65.
5. Sibagatullin S. K., Kharchenko A. S., Beginyuk V. A. Processing solutions for optimum implementation of blast furnace operation // Metallurgist. 2014. Vol. 58, iss. 3–4. P. 285–293.
6. Onorin O. P., Spirin N. A., Lavrov V. V., Kosachenko I. E. Assessing the shape of the viscoplastic iron-ore zone in a blast furnace // Steel in Translation. June 2013, Vol. 43, iss. 6. P. 335–340.
7. Babich A., Senk D., Gudenau H. W. Effect of coke reactivity and nut coke on blast furnace operation // Ironmaking and Steelmaking. 2009. Vol. 36, iss. 3. P. 222–229.
8. Kuzin A. V. Effect of introducing different sizes of nut coke into the ore layer on the degree of reduction of iron oxides // Metallurgist. 2014. Vol. 57, iss. 9–10. P. 783–791.

9. *Watakabe S., Takeda K., Nishimura H., Goto S., Nishimura N., Uchida T., Kiguchi M.* // *ISIJ International*. 2006. Iss. 4. P. 513–522.
10. *Mousa E., Senk D., Babich A.* Reduction of Pellets-Nut Coke Mixture under Simulating Blast Furnace Conditions // *Steel Research International*. 2010. Vol 81, iss. 9. P. 706–715.
11. *Huatao Z., Minghua Z., Ping D., and other.* Uneven distribution of burden materials at blast furnace top in bell-less top with parallel bunkers // *ISIJ International*. 2012. Vol. 52, iss. 12. P. 2177–2185.
12. *Chevychelov A. V., Pavlov A. V., Teplykh E. O., and other.* Charging coke nuts in the batch bunker // *Steel in Translation*. 2013. Vol. 43, iss. 7. P. 434–435.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РКУ-ПРЕССОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БРОНЗЫ

А. О. Толкушкин, О. Н. Кривцова, А. В. Доля

Карагандинский государственный индустриальный университет,
Темиртау

В работе проведено исследование влияния РКУ-прессования на микроструктуру и механические свойства однофазной оловянной бронзы. При анализе результатов исследования было выявлено, что размер зеренной структуры стабильно измельчается с каждым новым циклом деформирования. Также был проведен анализ влияния температуры начала деформации на эволюцию микроструктуры и механических свойств однофазной оловянной бронзы.

In the work carried out the study of the influence of ECAP on microstructure and mechanical properties of single-phase tin bronze. According to the analysis of the results of the study it was revealed that the size of the grain structure is consistently refining with each new cycle of deformation. Also, was conducted an analysis of the influence of the temperature of the beginning of deformation on the evolution of microstructure and mechanical properties of single-phase tin bronze.

В настоящее время одним из конструкционных материалов, используемых для деталей узлов трения ответственного назначения, работающих в сложных условиях эксплуатации, являются оловянные бронзы, которые обладают уникальным сочетанием высоких прочностных и упругих свойств, а также имеют высокую коррозионную стойкость, хорошие антифрикционные свойства и высокое сопротивление износу. Добиться повышения механических свойств данного сплава возможно путем получения ультрамелкозернистой структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД), так как именно ИПД демонстрирует хорошую перспективу при создании новых высокопрочных материалов с уникальным комплексом физических и механических свойств [1].

Наиболее перспективным методом реализации ИПД во всем объеме деформируемой заготовки является метод равноканального углового прессования (РКУП). На кафедре «Обработка металлов давлением» Карагандинского государственного индустриального университета был проведен целый ряд экспериментов по выявлению влияния многоцик-

лового равноканального углового прессования на эволюцию микроструктуры различных черных и цветных металлов и сплавов и изменению их механических свойств, в том числе и при реализации совмещенных процессов [2–4].

Так как вопросы, касающиеся влияния химического состава и термической обработки на структуру, механические и коррозионные свойства оловянных бронз, ранее уже исследованы достаточно подробно [5–6], то структурные аспекты при больших пластических деформациях в современной литературе рассмотрены недостаточно полно. Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы является исследование влияния РКУП на структуру и механические свойства однофазной оловянной бронзы.

Материалом исследования была выбрана однофазная бронза марки БрОЦ4–3. Для выравнивания химического состава в однофазной бронзе и для превращения двухфазной структуры с включениями твердой δ -фазы в однофазную α -фазу (в связи с чем повышается пластичность) бронзу подвергли гомогенизации при 700–750 °С с последующим быстрым охлаждением. Эксперимент проводили на заготовках квадратного сечения размером 12×12×55 мм. Данный размер исходных заготовок был выбран с целью обеспечения возможности проведения механических испытаний после осуществления процесса прессования.

Температура прессования должна быть ниже температуры начала рекристаллизации $(0,5 \div 0,6)T_{\text{пл}}$. Если для чистых металлов остается справедливым соотношение А.А. Бочвара $T_{\text{рекр}}/T_{\text{пл}} \approx 0,4$, то для однофазных твердых растворов за счет рационального легирования это отношение может быть увеличено до 0,6 [7]. При повышении температуры начала деформирования усиливается вероятность прохождения в ходе горячего деформирования динамической собирательной рекристаллизации, приводящей к нежелательному укрупнению зерна. Поэтому выбор температурного режима основывается на том, чтобы в процессе горячей деформации первичная рекристаллизация проходила полностью, а собирательная была подавлена. Одной из особенностей нано- и микрокристаллических материалов, полученных методами интенсивного пластического деформирования, является существенная нестабильность их структуры при нагреве. В частности, температура рекристаллизации в нано- и микрокристаллических материалах оказывается существенно ниже обычной температуры рекристаллизации чистых металлов и составляет $T_1 = 0,275 \div 0,35T_{\text{пл}}$ [8]. Исходя из изученных данных, было предложено проводить деформирование образцов при температурах: 25 °С; 320 °С и 520 °С.

В процессе РКУП скорость течения металла по сечению заготовки не одинакова – нижние слои опережают верхние. Это приводит к искажению первоначальной формы заготовки – заострению на торцах. При многоцикловом прессовании этот эффект нежелателен, т. к. возникает необходимость дополнительной правки заготовки между проходами. Чтобы свести этот негативный эффект к минимуму, рационально применение так называемого маршрута Вс, при котором заготовка после каждого цикла кантуется (поворачивается) вокруг продольной оси на 90°. Кроме того, такая кантовка обеспечивает знакопеременную деформацию и помогает измельчать зерно в процессе прессования [9].

Проведенный анализ зарубежных и отечественных литературных источников показывает, что в большинстве случаев рост накопленной деформации при РКУП после 6–8 проходов не приводит к дальнейшему измельчению структуры. Следовательно, можно полагать, что с увеличением накопленной деформации внутрикристаллические сдвиги не приводят к формированию новых дислокационных стенок и, соответственно, фрагментов, т. е. деформация происходит преимущественно за счет аккомодационных межфрагментных сдвигов, и этот механизм деформации становится преобладающим [10]. Также при повышении степени деформации сдвигом свойства деформируемого металла улучшаются, тем не менее при накоплении определенной степени деформации может произойти разрушение образца, что недопустимо. В связи с этим количество циклов деформирования для оловянной бронзы принято равным 8.

В качестве смазки при прессовании была выбрана смесь графита и масла, так как такая смазка хорошо образует пленку на металле.

Подготовка шлифов для металлографических исследований до и после прессования осуществлялась по стандартной методике, для исследования использовался оптический микроскоп Leica, оборудованный микротвердомером.

Для определения механических характеристик сплава до и после РКУП была использована крутильно-разрывная машина М140КУ. Для испытаний использовались стандартные образцы цилиндрической формы, скорость растяжения была 0,5 мм/мин. Это значение соответствует скорости деформации, равной $0,56 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

В исходном состоянии однофазная оловянная бронза имеет крупнозернистую структуру с большим количеством двойников, так как образцы были получены из прутка.

Для оценки эффективности РКУП необходимо сравнить микроструктуру бронзы до и после деформирования. Микроструктура оло-

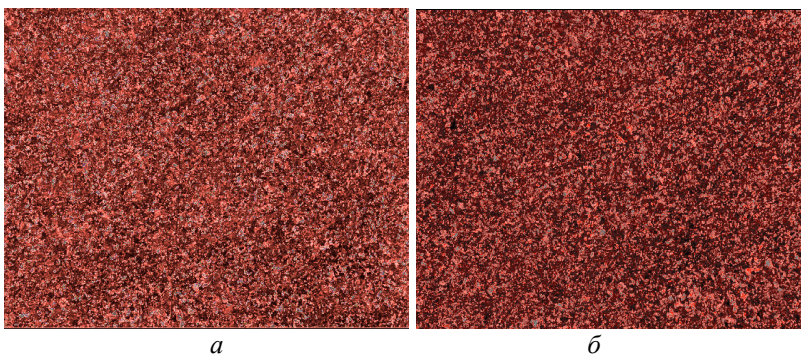
вянной бронзы, полученная после прессования при различных температурах, представлена на рис. 1.

Анализ микроструктуры однофазной оловянной бронзы марки БрОЦ4-3 после РКУП показал, что интенсивное измельчение зерна наблюдается после осуществления каждого цикла деформирования. После первых проходов структура разнoзернистая с большим разбегом размеров зерен, но к 7–8 проходу структура становится однородной с наличием большого количества большеугловых границ.

В ходе исследования микроструктуры после каждого цикла прессования было выявлено отставание эволюции зеренной структуры в продольном направлении. Микроструктура зачастую обладала выраженной текстурой деформирования. Также было обнаружено, что структура в поперечном направлении прорабатывается чуть более интенсивно, однако после осуществления 4–5 циклов прессования проработка структуры практически однородна по всем направлениям образца.

Минимальный размер зерна получен в ходе прессования сплава в равноканальной ступенчатой матрице при комнатной температуре и составляет 0,5 мкм. Полученная структура является однородной с большим количеством большеугловых границ. Но при этой температуре наблюдалось большое количество разрушений использованных образцов.

Анализ микроструктуры однофазной оловянной бронзы после прессования при температуре 320 °С показал, что данная температура прессования приходится на температурный интервал возврата, для которого характерны постепенное понижение плотности дислокаций, уменьшение концентрации избыточных дефектов, перераспределение дислокаций, приводящее к уменьшению уровня микроискажений. Структура в поперечном и продольном направлении после 8 проходов практически однородна по всему образцу.



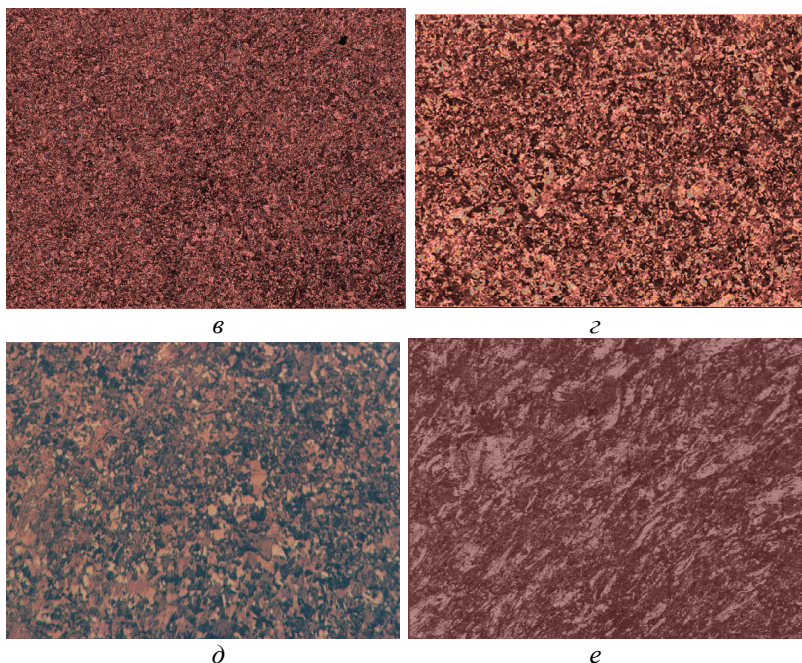


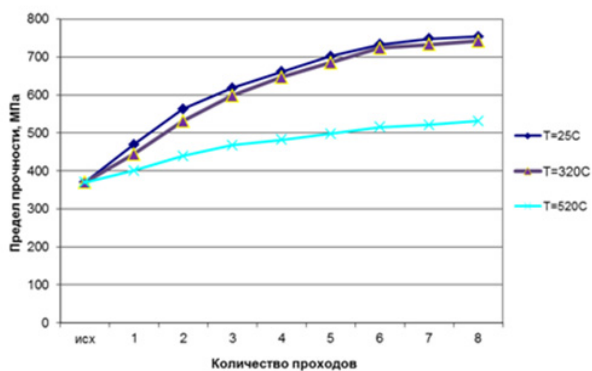
Рис. 1. Микроструктура сплава БрОЦ4-3

после 8 циклов прессования, $\times 1000$:

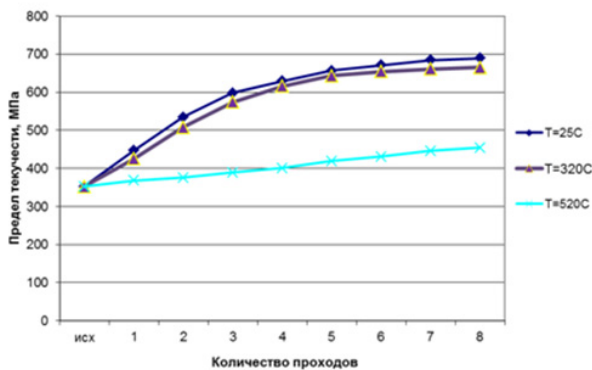
а – при температуре 25 °С, средний диаметр зерна 0,5 мкм; *б* – при температуре 25 °С (продольное направление), средний диаметр зерна 0,6 мкм; *в* – при температуре 320 °С, средний диаметр зерна 0,7 мкм; *з* – при температуре 320 °С (продольное направление), средний диаметр зерна 0,9 мкм; *д* – при температуре 520 °С, средний диаметр зерна 2,1 мкм; *е* – при температуре 520 °С (продольное направление)

Повышение температуры нагрева заготовки перед прессованием до 520 °С значительно снижает усилие прессования и сопротивление деформации, но увеличивается неравномерность течения металла, которая возрастает с увеличением температурного перепада между заготовкой и контейнером. Последнее приводит к неравномерному распределению сопротивления деформации по поперечному сечению заготовки. Охлаждение периферийных слоев ведет к более быстрому течению внутренних слоев заготовки. В результате этого структура становится разнотекстурной с выраженной текстурой деформирования. Также наблюдается большое расхождение между структурой в продольном и поперечном направлении.

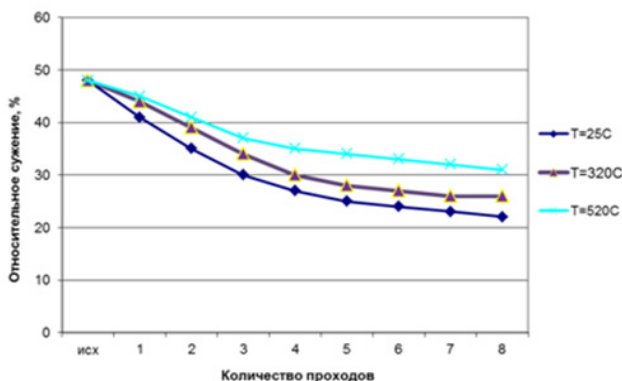
Результаты исследования механических характеристик сплава БрОЦ4-3 после каждого цикла прессования при различных температурах представлены на рис. 2.



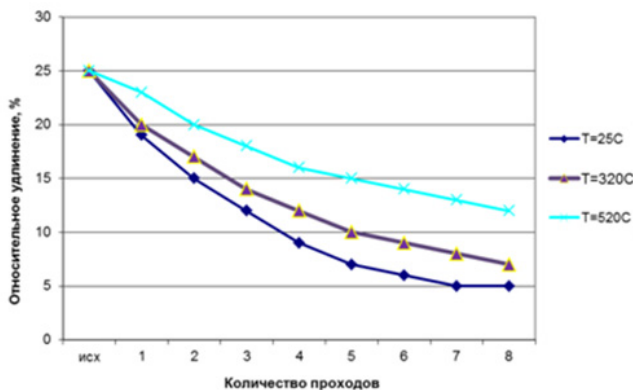
a



б



а



б

Рис. 2. Зависимость механических свойств сплава БрОЦ4-3 от цикла прессования

При РКУ-прессовании наиболее интенсивное упрочнение сплава наблюдается первые 2–3 прохода, а затем процесс деформационного упрочнения замедляется, но характеристики прочности повышаются. Повышение температуры прессования до 230 °С приводит к заметному снижению сопротивления деформации сплава. Наиболее интенсивное упрочнение сплава при этой температуре происходит при относительно небольших степенях деформации, затем процесс деформационного упрочнения замедляется, а при последующем деформировании начинает проявляться динамическое разупрочнение.

При температуре прессования 520 °С предел прочности повышается незначительно, что связано с динамическим разупрочнением.

Анализируя графики зависимости предела текучести, можно судить об интенсивности повышения предела текучести, что является следствием уменьшения площадки текучести на графиках усилие – деформация при испытании на растяжение.

Проведя анализ графиков зависимости относительного сужения и удлинения, мы видим существенное снижение пластических показателей к 4 циклу прессования. Далее снижение пластических показателей практически отсутствует. Повышение температуры прессования ведет также к снижению показателей, но не так интенсивно.

Также при температуре прессования 520 °С наблюдается сильная анизотропия свойств, заключающаяся в том, что в поперечном направлении прочностные характеристики выше по сравнению с продольным направлением.

Выводы

В ходе проведения эксперимента было выяснено, что при равноканальном угловом прессовании однофазной оловянной бронзы марки БрОЦ4-3 размер зеренной структуры стабильно измельчается с каждым новым циклом деформирования. А анализ влияния температуры начала деформирования на эволюцию микроструктуры и механические характеристики однофазной оловянной бронзы марки БрОЦ4-3 показал, что наиболее рациональным является прессование данного сплава при температуре 320 °С.

1. *Валиев Р. З., Александров И. В.* Объемные наноструктурные металлические материалы. М., 2007. 400 с.

2. *Lezhnev S., Volokitina I., Koinov Toncho.* Research of influence equal channel angular pressing on the microstructure of copper // J. of Chemical Technology and Metallurgy. 2014. Vol. 49, Nr 6. P. 621–630.

3. *Lezhnev S., Naizabekov A. B., Volokitin A. V., Volokitina I. E.* New combined process «pressing-drawing» and its impact on the properties of deformable aluminum wire // Procedia Engineering. 2014. Vol. 81. P. 1505–1510.

4. *Lezhnev S., Naizabekov A. B., Panin E. A., Volokitina I. E.* Influence of combined process «rolling-pressing» on microstructure and mechanical properties of copper // Procedia Engineering. 2014. Vol. 81. P. 1499–1505.

5. *Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В.* Промышленные цветные металлы и сплавы. М., 1974. 488 с.

6. *Мальцев М. В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. 2-е изд. М., 1970. 364 с.
7. *Громов Н. П.* Теория обработки металлов давлением. М., 1978. 360 с.
8. *Wang J., Iwahashi Y., Horita Z., Furukawa M. et al.* // *Acta mater.* 1996. Vol. 44. P. 2973–2982.
9. *Mishra A., Kad B. K., Gregori F., Meyers M. A.* Microstructural evolution in copper subjected to severe plastic deformation : Experiments and analysis // *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. P. 13–28.
10. *Рaab Г. И.* Развитие научных основ технологии интенсивной пластической деформации и создание оборудования по схеме равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлических полуфабрикатов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2009. С. 36–41.

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА АМОРФНЫХ МАГНИТОМЯГКИХ СПЛАВОВ

Г. В. Тягунов, Е. Е. Барышев, К. Ю Шмакова
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Получены температурные зависимости поверхностного натяжения (σ), удельного электросопротивления (ρ), магнитной восприимчивости (χ) и кинематической вязкости (ν) сплава $Fe_{82}B_{12}Si_4C_2$. Проведено сравнение свойств аморфных пленок, полученных по серийной и опытной технологиям. Показано, что научно обоснованная технология выплавки многокомпонентного сплава позволяет подготовить равновесный расплав, структура которого перед спиннингом оказывает существенное влияние на свойства аморфной ленты и кинетику ее кристаллизации.

Temperature dependences of the surface tension (σ), electric resistivity (ρ), magnetic susceptibility (χ) and kinematic viscosity (ν) $Fe_{82}B_{12}Si_4C_2$ alloys have been obtained. Comparison of the properties of amorphous ribbons obtained by the pilot and serial technologies has been conducted. Science-based technology of multi-component alloy smelting makes it possible to prepare equilibrium smelt, the structure of which has a significant effect on the properties of the amorphous ribbon before spinning and kinetics of its crystallization has been offered.

Магнитомягкие высоколегированные железоникелевые, железокобальтовые, железохромистые и другие сплавы обладают специальными физическими и физико-химическими свойствами. Уровень их определяется не только точным химическим составом, но и условиями их производства. Нормальные магнитные свойства, соответствующие нормативной технической документации, обеспечиваются выплавкой в открытых электропечах. Для получения сплавов с повышенными и высокими магнитными свойствами используют вакуумные установки и переплавные процессы [1–3].

Отличительная особенность магнитомягких сплавов определяется их высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой, способностью обрабатываться методами пластической деформации, повышенным удельным электросопротивлением.

Такие показатели достигаются введением в состав сплавов никеля, кобальта, хрома, марганца, молибдена, кремния и других элементов. Наряду с плавильными процессами важную роль играет термообработка

твердого металла [4]. Однако особенности строения сталей и сплавов, обусловленные прежде всего избирательностью затвердевания фаз и сопровождающиеся ликвацией элементов, оказывают существенное влияние на формирование свойств металлопродукции.

Производство нанокристаллических материалов, имеющих размер частиц от 1 до 10 нм, и аморфных магнитомягких сплавов позволило существенно повысить уровень специальных характеристик изделия.

Наиболее простым методом получения нанопорошков является испарение материала при контролируемой температуре в атмосфере инертного газа с последующей конденсацией пара либо в объеме реакционной зоны с образованием частиц сферической формы, либо на поверхностях – частицы с огранкой.

Плазмохимический метод получения нанопорошков является наиболее распространенным среди химических способов. Процесс протекания реакции осуществляется в неравновесных условиях, предусматривающих высокую скорость образования зародышей новой фазы и малую скорость их роста.

Осаждение наночастиц из коллоидных растворов заключается в последовательной реализации следующих операций: синтез из исходных реагентов раствора с прерыванием реакции в определенный момент времени, после чего дисперсная система переводится из жидкого коллоидного состояния в дисперсное твердое. Метод обладает высокой селективностью и позволяет получать частицы с очень узким размерным распределением.

По производительности весьма эффективным способом получения нанокристаллических порошков является механическое истирание. В процессе металлосинтеза происходит измельчение и пластическая деформация веществ, ускоряется массоперенос, а также осуществляется перемешивание компонентов смеси на атомарном уровне и активируется химическое взаимодействие твердых реагентов.

Способ получения нанопорошков путем регулируемой кристаллизации закаленного аморфного состояния конструктивно прост и наиболее распространен. Аморфная структура формируется при быстром (со скоростью $\geq 10^6$ град/с) охлаждении расплава. Струя жидкого металла с определенной скоростью направляется на поверхность быстровращающегося цилиндра (или диска), изготовленного из материала, обладающего высокой теплопроводностью (например, медь).

Структура нанокристаллического сплава представляет собой двухфазную систему, в которой одной из фаз являются нанокристаллы, а другой – остальная аморфная матрица. Свойства наносплава зависят от состава, размера и количества нанокристаллов, а также их соотно-

шения с аморфной фазой. Основное преимущество таких материалов перед кристаллическими состоит в благоприятном сочетании малой коэрцитивной силы H_c и высокой относительной магнитной проницаемости μ_{\max} . В состав, кроме основных компонентов – железа, никеля, кобальта – входят аморфизирующие элементы – бор, кремний, фосфор и др., снижающие температуру аморфизации t_a до соотношения $t_a/t_d = 0,45$, а также легирующие компоненты, участвующие в формировании специальных физических свойств и служебных характеристик готовой продукции.

Известно, что аналогом метастабильному аморфному состоянию является равновесная металлическая жидкость. Результаты исследований различных авторов ([1–3, 5, 6]) свидетельствуют о наличии в структуре этих материалов наноразмерных кластеров или локальных микрогруппировок, которые для теории аморфного и жидкого состояний имеют такое же значение, как элементарная ячейка для теории кристаллов [7]. Наличие локального порядка означает, по мнению авторов [8–10], что геометрическая фигура кластера близка к ГЦК, ГПУ-решеткам и стабильна во времени, т. е. время их жизни значительно превышает период колебаний атомов.

Расплавленные металлы и сплавы представляют собой конденсированное вещество, особое состояние которого обусловлено отсутствием выраженных границ раздела кластеров, искажением трансляционной симметрии и динамически возбужденным состоянием атомов, находящихся во внешнем атомном слое кластеров, энергетически сильным взаимодействием атомов внутри кластера, что способствует увеличению электронной плотности на уровне Ферми [1].

Доля внешних атомов в объеме кластера, оцененная с использованием экспериментальных данных, составляет около 15 %. Роль таких атомов в формировании свойств материалов становится еще значительнее, если учесть, что они имеют иную электронную конфигурацию в связи с изменением их валентности и уменьшением электронной плотности. Результатом является ослабление межатомного взаимодействия с другими атомами кластера и значительное увеличение амплитуды колебаний.

Другим важным аспектом строения металлических расплавов является их неравновесность и неоднородность, зависящие не только от состава, но и от условий сплавления компонентов. Неравновесность обусловлена неравномерным распределением атомов между кластерами, а неоднородность – неравномерным распределением отличающихся по структуре кластеров по объему вещества.

В многокомпонентных металлических расплавах скорость установления равновесия значительно меньше интенсивности изменений внешних условий. Следствием этого является длительное сохранение неравновесных состояний. Поэтому жидкие сплавы одинакового состава, находящиеся в одних и тех же условиях, могут отличаться параметрами ближнего порядка, характером межчастичных взаимодействий и распределением элементов. Отмеченное оказывает влияние на протекание таких процессов, как диффузия, кристаллизация, а затем фазовые превращения и распределение атомов в литом и деформированном металле [1]. Многочисленными исследованиями выявлена следующая закономерность: чем выше степень равновесности расплава перед затвердеванием, тем лучше показатели качества твердого металла [1–3].

В промышленных условиях равновесное или близкое к нему состояние расплава наиболее эффективно достигается термовременной обработкой жидкого металла в процессе выплавки. Режимы такой технологии разрабатываются на основе данных о структурно-чувствительных свойствах расплавов и показателях качества твердого металла [1, 3].

Рассмотрим влияние технологии выплавки с термовременной обработкой расплава (ТВО) на некоторые параметры структуры и свойства сплава $\text{Fe}_{82}\text{B}_{12}\text{Si}_4\text{C}_2$ в жидком и аморфном состояниях. На рис. 1 приведены температурные зависимости поверхностного натяжения (σ), удельного электросопротивления (ρ), магнитной восприимчивости (χ) и кинематической вязкости (ν), из которых видно, что при нагреве до определенных критической температуры (t_k) политермы нагрева и охлаждения не совпадают. Гистерезис отражает значительные структурные изменения, происходящие в расплаве при $t_{\text{нагр}} \geq t_k$. Наиболее информативной для сплавов на основе железа является кинематическая вязкость. Вблизи 1500 °С экспоненциальная зависимость $\nu(t)$ вырождается в линейную и в интервале $t_{\text{ан}} - t_r$ термический коэффициент $d\nu/dt$ практически равен нулю, а для некоторых сплавов становится положительным.

Для многокомпонентных сплавов структурное состояние является весьма сложным из-за сильного химического взаимодействия разнородных атомов. Для изучаемого состава оно проявляется в образовании боридов, силицидов и карбидов различного типа, каждый из которых потенциально обладает способностью кластерообразования. Поэтому в многокомпонентных жидкостях одновременно могут существовать кластеры различных типов на основе отдельных компонентов или их химических соединений.

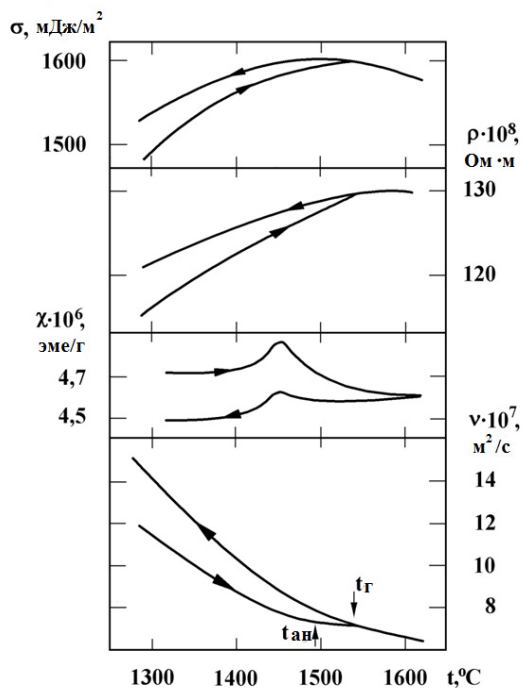


Рис. 1. Температурные зависимости поверхностного натяжения (σ), удельного электросопротивления (ρ), магнитной восприимчивости (χ) и кинематической вязкости (ν) жидкого сплава $\text{Fe}_{82}\text{B}_{12}\text{Si}_4\text{C}_2$ при нагреве и охлаждении

Кластеры не являются обычными термодинамическими флуктуациями плотности и представляют собой достаточно устойчивые образования со структурой, близкой к ГЦК, ГПУ-решеткам, время жизни которых $\tau_{\text{кл}} = (10-11) \times 10^{-9}$ с значительно превышает период тепловых колебаний атомов. Локальный ближний порядок в кластерах определяется характером и особенностями межатомных взаимодействий, а также технологической предыстории.

В системах с более сильным взаимодействием, в отличие от простых жидкостей, естественно ожидание более жесткого упорядочения, охватывающего несколько координационных сфер. В кластере такого размера потенциальная энергия, как функция атомных позиций, имеет несколько минимумов, что позволяет описать кластер в терминах набора локальных состояний [11].

Представление локальных состояний предложено в работах [12, 13], в которых жидкость рассматривается как система, состоящая из локальных объемов, каждый из них может находиться в одном из нескольких конфигурационных состояний. Возможный полиморфизм жидкостей в рамках этой теории рассмотрен в работе [14].

Приближение расплава к равновесному состоянию осуществляется последовательным разупорядочением кластеров в процессе нагрева выше $t_{\text{ан}}$ (рис. 1) и заканчивается вблизи $t_{\text{к}}$, т. е. температуры разупорядочения наиболее термически устойчивого типа кластеров и равновесным распределением элементов по субмикроскопическим объемам расплава [1].

В условиях равновесного распределения атомов различных элементов доля вновь образующихся кластеров возрастает, и они обладают энергетически более выгодными меньшими размерами и большим кристаллографическим сродством между собой, что облегчает зарождение центров кристаллизации.

Уменьшение размеров кластеров сопровождается ростом межкластерного пространства или разупорядоченной зоны до 15–45 % объема вещества. По сравнению с кластерами структурные элементы разупорядоченной зоны, состоящие из нескольких атомов, характеризуются меньшей энергией межчастичного взаимодействия, большим средним межатомным расстоянием и меньшей электронной плотностью, что способствует аморфизации сплавов.

Отмеченные особенности строения жидких металлов обусловлены изменениями при определенных температурах структурного фактора и функции радиального распределения атомов при сохранении их общего вида, что, несомненно, находит отражение в величине физико-химических свойств и их температурных зависимостях [1–3, 10, 15].

В процессе вязкого течения происходит передача импульса движения от одного атомного слоя к другому без нарушения сплошности и межчастичных связей. Энергия активации вязкого течения характеризует величину энергии межатомного взаимодействия, т. е. кинетической энергии, проявляющейся в движении.

Структура металлических жидкостей хотя и описывается двумя составляющими, однако это не коллоидные или эмульсионные системы, и поэтому в вязком течении принимают участие и кластеры и разупорядоченная зона. Усиление межатомного взаимодействия в кластерах способствует увеличению количества атомов в вязком течении и диссипации подводимой к системе энергии. В связи с этим зависимость $\nu(t)$ при охлаждении характеризуется повышенными значениями кинематической вязкости (рис. 1).

Поверхностное натяжение (σ) сплава $\text{Fe}_{82}\text{B}_{12}\text{Si}_4\text{C}_2$ определяется концентрацией поверхностно активных элементов во внешнем атомном слое. Формирование структуры расплава в условиях равновесного распределения атомов создает предпосылки более активного участия таких элементов в процессе кластерообразования. Увеличение количества кластеров приводит к уменьшению количества активных элементов в поверхностном слое и, как следствие, политерма охлаждения располагается выше по сравнению с ветвью $\sigma(t)$ при нагреве (рис. 1), т. е. поверхностное натяжение увеличивается.

Термовременная обработка расплава способствует (рис. 1) росту удельного электросопротивления (ρ) и уменьшению магнитной восприимчивости (χ). Отмеченное связано с усилением межатомных связей в кластерах и уменьшением количества носителей заряда; уменьшением размеров кластеров и ростом их количества, т. е. возрастанием рассеивания электронов проводимости; увеличением плотности электронов в кластерах и изменением валентности атомов, находящихся во внешнем слое кластеров и имеющих большую амплитуду тепловых колебаний из-за слабого межчастичного взаимодействия с другими атомами кластера.

Таким образом, термовременная обработка расплава способствует формированию равновесной и микрооднородной структуры расплава. При этом жидкий металл характеризуется большей способностью к переохлаждению, разливается ламинарной и плотной струей при спиннинговании. Отсутствие турбулентности и разбрызгивания обеспечивает качественный внешний вид аморфной пленки.

При сверхбыстрой закалке ($v \geq 10^6$ град/с) в переохлажденной жидкости и в аморфной пленке сохраняются основные структурные параметры исходного расплава.

Опытная технология по сравнению с серийной при одинаковых условиях спиннингования позволяет получить аморфную ленту большей толщины с меньшей в 3–5 раз шероховатостью внешней поверхности (рис. 2), что благоприятно отражается не только на внешнем виде материала, но и способствует улучшению его качественных показателей. В поперечном сечении такие ленты характеризуются однородной и предпочтительной структурой, обладают большей пластичностью при испытаниях на изгиб.

Последнее обстоятельство имеет важное практическое значение, так как аморфная лента является исходным материалом для изготовления различной продукции.

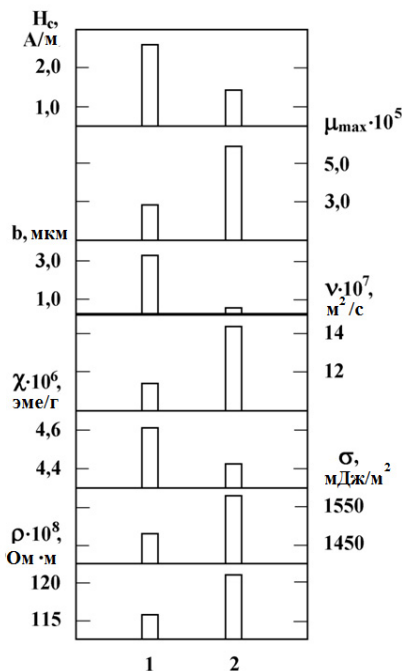


Рис. 2. Влияние технологии выплавки на свойства сплава $Fe_{82}B_{12}Si_4C_2$ в жидком (1300 °С) и аморфном состояниях:

1 – серийная технология;

2 – технология с термовременной обработкой расплава

С ростом пластичности повышается технологичность ленты, улучшается диссипативность деформационных напряжений в материале и сохраняется высокий уровень магнитных свойств [16].

Аморфные ленты используются для получения нано- и микрокристаллических материалов путем их отжига. Для изучения кинетики их кристаллизации использовали метод дифференциально-термического анализа (ДТА). Процесс кристаллизации, характеризующийся пиком выделения тепла, аморфных лент серийной и опытной технологии с ТВО расплава протекает в две стадии (рис. 3). Первый пик на кривой ДТА у образца опытной технологии проявляется при температуре на 50° выше, чем у серийного, т. е. аморфная структура ленты, полученной из равновесного расплава, обладает большей термической устойчивостью.

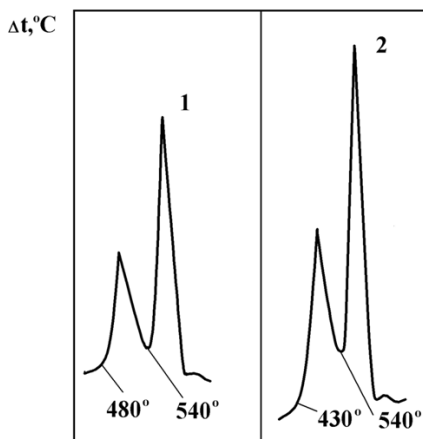


Рис. 3. Результаты дифференциально термического анализа образцов аморфной ленты $\text{Fe}_{82}\text{B}_{12}\text{Si}_4\text{C}_2$, отличающихся технологией выплавки:

1 – серийная технология;

2 – технология с термовременной обработкой расплава

Сравнение пиков выделений тепла при кристаллизации свидетельствует о большей степени аморфности лент технологии с ТВО расплава. Такие ленты остаются аморфными при толщине 40 мкм, а серийные при толщине 30 мкм и выше становятся нано- и микрокристаллическими, что ухудшает их пластические свойства.

Из представленных на рис. 2 данных видно, что между структурно чувствительными свойствами сплава $\text{Fe}_{82}\text{B}_{12}\text{Si}_4\text{C}_2$ в жидком состоянии (v , ρ , σ и χ) и показателями качества аморфного металла существует корреляционная зависимость.

Таким образом, выполненное исследование показывает, что научно обоснованная технология выплавки многокомпонентного сплава позволяет подготовить равновесный расплав, структура которого перед спиннингованием оказывает существенное влияние на свойства аморфной ленты и кинетику ее кристаллизации.

1. Баум Б. А., Хасин Г. А., Тягунов Г. В. и др. Жидкая сталь. М., 1984. 206 с.

2. Еланский Г. Н., Еланский Д. Г. Строение и свойства металлических расплавов. М., 2006. 228 с.
3. Тягунов Г. В., Барышев Е. Е., Цепелев В. С. Жидкий металл. Порошки. Екатеринбург, 2014. 192 с.
4. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. М., 1999. 408 с.
5. Graebner J. E., Goldling B. Phonon localization in aggregates // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 34, iss. 8. P. 5788–5790.
6. Duval E., Boukenter A., Champagnon B. Low-frequency Raman scattering from fractal vibrational modes in a silica gel // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 56. P. 2052–2055.
7. Машковский В. К., Новиков В. Н., Соколов А. Р. О структуре неупорядоченных тел // УФН. 1993. Т. 163, № 5. С. 119.
8. Митусь А. С., Паташинский А. З. Теория кристаллического упорядочения // ЖЭТВ. 1981. Т. 80. С. 1554–1563.
9. Patashinski A. Z., Chertkov M. V. Local state representation in statistical mechanics of condensed matter. Print INP 91-05. Novosibirsk, 1991. 52 p.
10. Замятин В. М., Баум Б. А., Мезенин А. А., Шмакова К. Ю. Временные зависимости свойств расплавов, их значение, особенности, варианты объяснения // Расплавы. 2010. № 5. С. 19–31.
11. Сон Л. Д., Русаков Г. М. Модель фазового перехода в расплаве // Расплавы. 1995. № 5. С. 90–95.
12. Ладьянов В. И. Структурные превращения в металлических расплавах и их проявление при затвердевании и кристаллизации быстрозакаленных сплавов : дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Ижевск, 2004. 310 с.
13. Васин М. Г., Стекольников В. А., Ладьянов В. И. Полиморфные переходы в однокомпонентных жидкостях. Ч. 2: Теоретическое описание // Вестн. Удмурт. ун-та. Физика. 2006. № 4. С. 93–114.
14. Ватолин Н. А., Пастухов Э. А. Дифракционные исследования высокотемпературных расплавов. М., 1980. 188 с.
15. Dubinin N. E., Filippov V. V., Malkhanova O. G., Vatolin N. A. Structure factors of binary liquid metal alloys within the square-well model Centr // Europ. J. of Phys. 2009. Vol. 7. P. 584–590
16. Кузнецов П. А., Васильев О. В., Маннинен С. А. Влияние упругих изгибных деформаций на магнитные и экранирующие свойства рулонного магнитного экрана // Вопр. материаловедения. 2011. № 4. С. 31–35.

Работа поддержана в рамках научных исследований высших учебных заведений Российской Федерации по государственному заданию № 2014/236.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ

А. А. Уманский¹, А. В. Головатенко², В. Н. Кадыков¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк;

²ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический ком-
бинат, Новокузнецк

Проведенными исследованиями установлены количественные зависимости сопротивления деформации рельсовой стали от ее химического состава. В частности, показано, что наиболее значительное повышение сопротивления деформации наблюдается при уменьшении содержания в стали ванадия и увеличении концентрации серы. Разработана математическая модель прогнозирования сопротивления деформации рельсовой стали при изменяющемся химическом составе. Проверка адекватности модели путем сравнительного анализа расчетных и фактических данных по усилию прокатки в клетях рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» показала возможность ее использования при проектировании новых режимов прокатки в производственных условиях.

Study found the quantitative dependence of the resistance of deformation of the rail steel on its chemical composition. In particular it is shown that the most significant increase in deformation resistance is observed with decreasing the content of vanadium in the steel and increase the sulfur concentration. A mathematical model for predicting the deformation resistance of rail steel with changing chemical composition. Checking the adequacy of the model through a comparative analysis between the calculated and actual data on the rolling force in the rolling mill stands of "EVRAZ ZSMK" showed the possibility of its use in the design of new modes of rolling in a production environment.

В процессах обработки металлов давлением, в том числе прокатке, термином «сопротивление деформации» обозначают напряжение, вызывающее пластическую деформацию материала при данных термомеханических условиях деформирования. Таким образом, сопротивление деформации является механической характеристикой, оказывающей определяющее влияние на энергосиловые параметры прокатки, и определение действительных значений сопротивления деформации является важной научно-производственной задачей.

На сегодняшний день наиболее надежным способом определения сопротивления деформации при различных условиях прокатки по-прежнему остаются экспериментальные исследования, а именно методы горячих испытаний на растяжение, кручение и сжатие. Поэтому в литературных источниках имеется информация о действительных значениях сопротивления деформации только для ограниченного числа марок сталей [1–4], в частности, применительно к рельсовым сталям такая информация отсутствует.

Ранее проведенные на модуле комплекса для физического моделирования Gleeble System 3800 исследования [5] позволили получить экспериментальные зависимости сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ от термомеханических параметров прокатки, обобщение которых позволило построить математическую модель вида:

$$\sigma = A \cdot e^{m_1 \cdot t} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot e^{\frac{m_3}{\varepsilon}} \cdot (1 + \varepsilon)^{m_4 \cdot t} \cdot e^{m_5 \cdot \varepsilon} \cdot u^{m_6 \cdot t}, \quad (1)$$

где A , m_1 – m_6 – константы;
 t – температура прокатки, °С;
 ε – степень деформации;
 u – скорость деформации, с⁻¹.

При этом численные значения констант A , m_1 – m_6 были получены только для образцов от исследуемых плавок конкретного химического состава.

С целью создания универсальной модели зависимости сопротивления деформации от термомеханических параметров прокатки, учитывающей влияние химического состава стали, проведено исследование численного влияния содержания в стали Э78ХСФ основных элементов (С, Si, Mn, Cr, S, P, V) на значения констант уравнения (1).

При проведении исследования использовали методику множественного регрессионного анализа.

На анализируемых плавках интервал изменения концентрации вышеуказанных химических элементов составил:

- для углерода – 0,75–0,79 %;
- для кремния – 0,32–0,55 %;
- для марганца – 0,78–1,09 %;
- для хрома – 0,42–0,57 %;
- для серы – 0,005–0,015 %;
- для фосфора – 0,012–0,017 %;
- для ванадия – 0,04–0,07 %.

В результате проведенного анализа получены уравнения регрессии вида:

$$A = 4365,4 + 69118 \cdot S, \quad (2)$$

$$m_1 = -0,0033 - 0,0043 \cdot V, \quad (3)$$

$$m_2 = 0,2607 - 5,7663 \cdot P, \quad (4)$$

$$m_3 = -0,0025 + 0,00308 \cdot C + 0,00025 \cdot Mn, \quad (5)$$

$$m_4 = -0,0015 + 0,0475 \cdot P, \quad (6)$$

$$m_5 = -0,407 + 0,655 \cdot Mn, \quad (7)$$

$$m_6 = 0,0002 - 0,0012 \cdot V. \quad (8)$$

Обобщая полученные данные о влиянии химического состава стали на константы уравнения (1) и, следовательно, на сопротивление деформации, можно констатировать, что на сопротивление деформации рельсовой стали Э78ХСФ оказывает значимое влияние изменение содержания следующих химических элементов: углерод, марганец, сера, фосфор и ванадий. Влияния кремния и хрома не выявлено.

Увеличение содержания углерода и марганца в стали в рассматриваемых пределах приводит к повышению сопротивления деформации. Полученные данные согласуются с результатами других исследований [6], которые свидетельствуют о снижении пластичности легированных сталей при увеличении содержания перечисленных элементов.

Повышение концентрации серы и фосфора приводит к увеличению сопротивления деформации стали Э78ХСФ, что обусловлено резко отрицательным влиянием данных элементов на пластические свойства стали. По данным многочисленных исследований влияние серы и фосфора на пластичность стали наблюдается даже при относительно низком их содержании, что обусловлено свойством образуемых ими соединений концентрироваться в межзеренном пространстве в процессе кристаллизации слитков. Так превышение концентрации серы в областях по границам дендритов над среднеплавочным значением может достигать 15...2000 раз, для фосфора разница концентраций составляет 10...25 раз [7]. Например, известно утверждение А. П. Гуляева об отрицательном влиянии фосфора при любых его концентрациях [8].

Увеличение содержания ванадия в рассматриваемой стали с 0,04 до 0,07 %, наоборот, приводит к снижению сопротивления деформации, что объясняется значительным влиянием присадок ванадия даже в небольших количествах на повышение пластичности стали.

Отсутствие влияния кремния на сопротивление деформации объясняется его незначительной концентрацией в рассматриваемой стали (до 0,55 %) – имеются данные [6], что кремний значительно повышает сопротивление деформации сталей только при его концентрации на уровне 1,5–2,0 %. Касательно хрома можно отметить, что по данным [6] для высокоуглеродистых хромистых сталей (с содержанием хрома бо-

лее 0,45 %) решающее влияние на сопротивление деформации оказывает не хром, а углерод.

Анализ полученных уравнений регрессии (2–8) показал, что наибольшее влияние на сопротивление деформации в рассматриваемом интервале изменения содержания химических элементов стали оказывают ванадий и сера.

Так по расчетным данным, полученным с использованием модели (1), снижение содержания ванадия с 0,07 % до 0,04 % при одновременном увеличении содержания серы с 0,005 % до 0,015 % и неизменном содержании остальных химических элементов приводит к увеличению сопротивления деформации на 31 % (рис. 1).

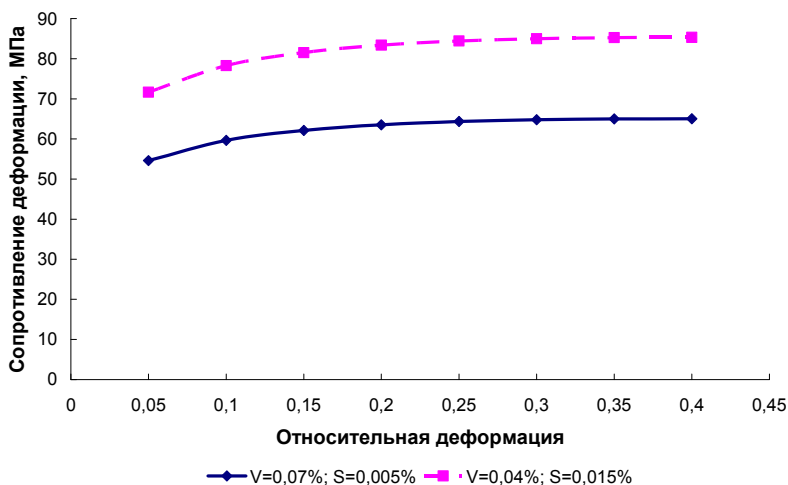


Рис. 1. Сопротивление деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различном содержании ванадия и серы

С целью проверки адекватности разработанной универсальной модели проведен расчет усилия прокатки по проходам при производстве рельса Р65 из стали Э78ХСФ.

Расчет производили по методике согласно рекомендаций авторов работы [9].

Усилие прокатки (P) определяли как произведение среднего давления металла на валки (p_{CP}) и площади контакта металла с валками (F):

$$P = p_{CP} \cdot F \quad (9)$$

В свою очередь площадь контакта металла с валками находится из выражения:

$$F = B_{CP} \cdot l_D, \quad (10)$$

где l_D – длина дуги захвата металла валками;

B_{CP} – средняя ширина полосы до и после прокатки.

Выражение (10) может быть преобразовано к виду:

$$F = \frac{B_0 + B_1}{2} \cdot \sqrt{R_K \cdot \Delta h}, \quad (11)$$

где B_0 и B_1 – ширина полосы до и после прокатки соответственно;

R_K – катающий радиус;

Δh – абсолютное обжатие.

Среднее давление металла на валки находится по формуле

$$p_{CP} = \gamma \cdot n_{\sigma'} \cdot n_{\sigma''} \cdot n_{\sigma'''} \cdot \sigma_\Phi, \quad (12)$$

где γ – коэффициент, учитывающий влияние среднего нормального напряжения σ_2 ;

$n_{\sigma'}$ – коэффициент, учитывающий влияние внешнего трения;

$n_{\sigma''}$ – коэффициент, учитывающий влияние внешних зон;

$n_{\sigma'''}$ – коэффициент, учитывающий влияние натяжения;

σ_Φ – сопротивление деформации.

При прокатке полос со свободным уширением $\gamma = 1$.

Формула для определения коэффициента $n_{\sigma'}$ зависит от отношения длины дуги захвата к средней высоте полосы до и после прокатки $\left(\frac{l_D}{h_{CP}} \right)$.

При значении показателя $\left(\frac{l_D}{h_{CP}} \right) < 1$ коэффициент определяется по формуле

$$n_{\sigma'} = 1 + \frac{l_D}{6 \cdot h_{CP}}, \quad (13)$$

$$n_{\sigma''} = \left(\frac{l_D}{h_{CP}} \right)^{-0,4}. \quad (14)$$

Так как прокатка осуществляется без натяжения, то $n_{\sigma'''} = 1$

Сопротивление деформации определяли по математической модели (формула (1)), при этом для расчета констант уравнения использовали химический состав стали Э78ХСФ, соответствующий средним значениям согласно требований ГОСТ Р 51685-2000 для углерода, марганца, кремния и хрома; содержание ванадия приняли равным 0,07 % исходя из того, что на практике его содержание стараются выдерживать ближе к нижнему пределу (0,04 %); содержание серы и фосфора приняли 0,015% для каждого элемента (табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав стали Э78ХСФ, принятый при расчетах
усилия прокатки**

Содержание элемента, %						
C	Si	Mn	Cr	V	S	P
0,78	0,60	0,90	0,50	0,07	0,015	0,015

Скорость деформации находили по формуле

$$u = \frac{v \cdot \Delta h}{l_d \cdot h_0}, \quad (15)$$

где v – скорость прокатки.

Степень деформации находили из выражения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}. \quad (16)$$

Температуру выдачи заготовки из нагревательной печи принимали равной 1200 °С.

Изменение температуры раската по проходам определяли с помощью методики [10], позволяющей рассчитать падение температуры:

$$\Delta t_i = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0255 \cdot \Pi_i \cdot \tau_i}{S_i} + \left(\frac{1000}{t_{oi} + \Delta t_{Di} + 273} \right)^3}}, \quad (17)$$

где Π_i – периметр поперечного сечения после прохода;

τ_i – время охлаждения раската при перемещении;

t_{oi} – температура перед входом в рассматриваемый калибр;

Δt_{Di} – повышение температуры раската в рассматриваемом калибре.

$$\Delta t_{дi} = 0,183 \cdot \sigma \cdot \ln \lambda , \quad (18)$$

где σ – сопротивление металла пластической деформации;
 λ – коэффициент вытяжки.

Результаты расчетов усилия прокатки при прокатке в обжимных клетях и данные по их сопоставлению с фактическими усилиями представлены на рис. 2.

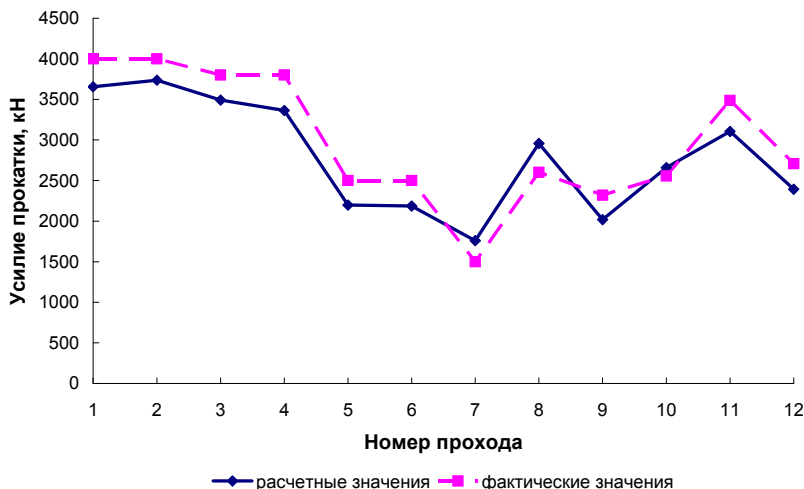


Рис. 2. Усилие прокатки при деформации заготовок рельсовой стали в обжимных клетях рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

По полученным данным погрешность не превышает 15 %, что говорит о возможности использования разработанной математической модели расчета сопротивления деформации при проектировании новых режимов прокатки в производственных условиях.

1. Карпов С. В., Банищиков А. А., Карпова А. С. Сопротивление деформации марганцовистых // Ползуновский альманах. 2003. № 8. С. 123–126.

2. Приходько И. Ю., Сергеенко А. А., Разносилин В. В. Метод определения сопротивления деформации металлов со сложной зависимостью реологических свойств от параметров деформирования // Фунда-

ментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. Днепропетровск, 2007. Вып. 14. С. 187–193.

3. Развитие теории и практики металлургических технологий : монография: в 3 т. / под. ред. В. Н. Перетятко, Е. В. Протопопова, И. Ф. Селянина. Т. 2: Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением. М., 2010. 352 с.

4. Зюзин В. И., Бровман М. Я., Мельников А. Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. М., 1964. 270 с.

5. Головатенко А. В., Кадыков В. Н., Уманский А. А. Исследование сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различных условиях прокатки // Вестн. гор.-металлург. секции Российской академии естественных наук. Отд.-ние металлургии : сб. науч. тр. Москва ; Новокузнецк, 2014. Вып. 33. С. 64–71.

6. Зюзин В. И., Бровман М. Я., Мельников А. Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. М., 1964. 270 с.

7. Suzuki H. // Testu to hagane. J.I.S.I. Japan, 1981. Vol. 67, Nr 4. P. 166.

8. Голубцов В. А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи. Челябинск, 2006. 423 с.

9. Смирнов В. К., Шилов В. А., Инатович Ю. В. Калибровка прокатных валков. М., 2008. 490 с.

10. Зяблицева Е. О., Литвинов Р. А., Шилов В. А. Моделирование температурных полей при прокатке рельсов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 5. С. 51–53.

ХИМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ АЛЮМИНИЯ В СОЛЕВОМ РАСПЛАВЕ

Е. П. Фарафонтова, Н. Т. Шардаков

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

В реакторе закрытого типа изучен процесс окисления алюминия парами воды в расплавленной эвтектической смеси хлоридов калия и лития и ее отсутствии при температурах 673-883 К и давлениях 0.26-2.6 МПа. Показано, что солевой расплав оказывает каталитическое действие, повышая скорость окисления алюминия на несколько порядков. Определены продукты взаимодействия. Сделана оценка кинетических параметров процесса окисления: порядка реакции, энергии активации и предэкспоненциального множителя. Предложен механизм взаимодействия.

The oxidation process of aluminum by water vapor in the molten eutectic mixture of potassium and lithium chloride and its absence at the temperatures 673-883 K and pressures and 0.26-2.6 MPa in the closed type reactor was studied. It was shown that the salt melt has a catalytic effect increasing the oxidation rate of aluminum by several orders. Reaction products were determined. The kinetic parameters of oxidation process (reaction order, activation energy and pre-exponential factor) were estimated. The mechanism of interaction is proposed.

Введение

Тонкая, практически бездефектная оксидная пленка на поверхности алюминия хорошо изолирует металл от агрессивной окружающей среды [1], что значительно упрощает его хранение, транспортировку, использование в качестве конструкционного или функционального материала. Однако если алюминий используется в качестве химического реагента, оксидная пленка может существенно тормозить процесс. Наиболее неблагоприятным является случай, когда оксид алюминия образуется в процессе химического взаимодействия – при горении алюминия в качестве горючего твердого топлива реактивных двигателей или пиротехнических средств, при его окислении водой в генераторах водорода и т. п. В этих случаях хорошие защитные свойства оксидной пленки являются препятствием для эффективного протекания процесса. Для снижения ее защитных свойств предлагается механическая активация [2–4] или использование сплавов вместо чистого алюминия [5]. В [6]

для активации процесса воспламенения алюминия в термитные смеси вводили солевую добавку – хлорид хрома (CrCl_3), что позволило снизить критическую температуру воспламенения на 400 К.

Целью данной работы являлось определение влияния химической активации на скорость окисления алюминия парами воды при повышенных температурах. Для химической активации алюминий погружали в расплавленную эвтектическую смесь хлоридов калия и лития. Выбор хлоридов щелочных металлов обусловлен тем, что они являются продуктами разложения окислителя твердых топлив и пиротехнических составов – перхлоратов [7]. Представляло интерес выяснить, могут ли они играть какую-либо активную роль при горении твердого топлива, содержащего в качестве горючего алюминий, или являются инертными балластными веществами.

Эксперимент

Эксперименты по определению скорости окисления алюминия парами воды проводили в реакторах закрытого типа – ампулах из кварцевого стекла объемом $\sim 30 \text{ см}^3$. Образцы алюминия (марки А999) представляли собой кусочки фольги размером $10 \times 10 \text{ мм}$ и толщиной 1 мм (использование порошков было нецелесообразно из-за сложности учета площади взаимодействия). Хлориды калия и лития брали в соотношении 56 мас. % KCl и 44 мас. % LiCl , квалификация солей ОСЧ. Количество солевой смеси в реакторе составляло 8 г, ее температура плавления 631 К. После помещения солевой смеси и алюминия в ампулу ее откачивали до остаточного давления $\sim 10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$, с помощью дозатора вводили заданное количество дистиллированной воды, после чего запаивали. В контрольных опытах вода или соль отсутствовали. Запаиваемые ампулы выдерживали в печи сопротивления, предварительно нагретой до заданной температуры, затем охлаждали на воздухе. Температура в печи составляла 673, 773 или 883 К, время выдержки 0,5; 1; 2; 3; 4 или 10 ч. В некоторых случаях запаиваемую ампулу помещали в камеру высокотемпературного микроскопа НМ-456 Union (Япония), и за процессом взаимодействия наблюдали через микроскоп при 100-кратном увеличении. Охлажденную ампулу вскрывали в камере дозирующего устройства масс-спектрометра МИ-1330 (для анализа газовой фазы), затем помещали в стакан с дистиллированной водой. Отмытый образец сушили, взвешивали на аналитических весах ВЛР-200 с точностью не ниже 0,15 мг и определяли изменение массы. Фазовый состав твердых продуктов взаимодействия анализировали с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3. Водный раствор солевого плава на содержание ионов

алюминия анализировали атомно-адсорбционным спектрометром фирмы Perkin Elmer, pH раствора определяли ионометром И-130.

Для термодинамического анализа химических реакций рассчитывали приближенное значение константы равновесия [8]:

$$\lg K = -\frac{\Delta H_{298}^o}{4.576 \cdot T} + \frac{\Delta S_{298}^o}{4.576},$$

где ΔH_{298}^o – изменение энтальпии в ходе протекания химической реакции при температуре 298,15 К между веществами, находящимися в стандартном состоянии; ΔS_{298}^o – изменение энтропии в ходе протекания химической реакции при температуре 298,15 К между веществами в стандартном состоянии; T – абсолютная температура, К.

Контрольные опыты ($T = 883$ К, время – 10 ч) показали, что окисление алюминия водой в отсутствие солевых добавок протекает очень медленно. Изменение массы образцов при этом соизмеримо с погрешностью измерений (табл. 1).

Таблица 1

Изменение массы образцов

Масса воды в ампуле, мг	21±6	140±35	460±100
Прибыль массы образцов, мг	0,30	0,00	0,25

Введение в реактор хлоридов повышает скорость окисления на несколько порядков до 0,7 кг/м²·ч (скорость окисления алюминия в солевой смеси без воды при этих же температурах не превышает 1 г/м²·ч). Взаимодействие носит линейный характер – скорость в течение всего процесса остается практически постоянной (рис. 1).

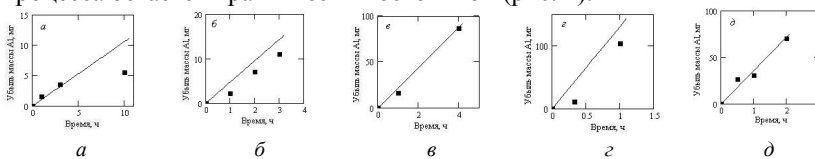


Рис. 1. Потери массы образцов алюминия:

Площадь образцов – 2 см². Начальное содержание воды в реакторе:

а – 21±6; б, д – 50±10; в – 120±30; г – 180±40 мг.

Температура: а, б, в – 673 К; г – 773 К; д – 883 К.

Точки – экспериментальные данные,
сплошные линии – графики решения уравнения (2)

Продуктами взаимодействия являются оксид алюминия – $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, слабо сцепленный с металлом, газообразный водород и следы азота, диоксида углерода, кислорода и хлорида водорода (рис. 2). Время взаимодействия – 1 ч, температура – 773 К, начальная масса воды в реакторе – (180 ± 40) мг; вставка – фон камеры масс-спектрометра. Оксид алюминия, как правило, в виде пористой массы искаженной сферической формы плавал на поверхности расплава. При растворении охлажденного расплава в воде, пористая масса разделялась на отдельные частички размером < 1 мкм.

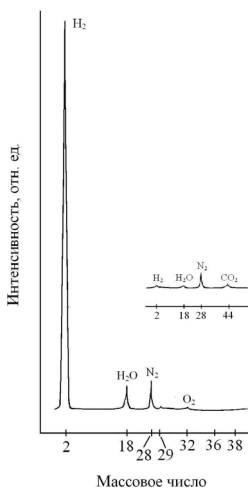
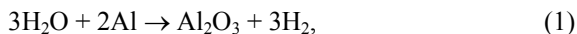


Рис. 2. Масс-спектр газовой фазы после взаимодействия алюминия с парами воды в расплаве 0,42KCl-0,58LiCl

При наблюдениях с помощью высокотемпературного микроскопа наблюдали бурное газовыделение и образование осадка вблизи поверхности образца. Заметных количеств алюминия ни в газовой фазе, ни в солевом плаве не обнаружено. Водный раствор плава имел нейтральный характер ($\text{pH}=5,5$).

Кинетика окисления алюминия. Если допустить, что взаимодействие алюминия с водой описывается суммарной реакцией



а пары воды и молекулярный водород являются идеальными газами, можно отметить следующее:

1. Общее давление в реакторе в течение эксперимента не меняется, так как уменьшение парциального давления паров воды компенсируется увеличением парциального давления водорода. Отсюда следует, что общее давление численно равно начальному давлению паров воды в реакторе;

2. Скорость окисления алюминия определяется только температурой и общим давлением в реакторе и не зависит от парциального давления паров воды.

Исходя из вышесказанного и предполагая аррениусовский характер температурной зависимости, выражение для скорости окисления алюминия можно записать в виде

$$W = k \cdot p_s^n = A \cdot \exp(-E / RT) \cdot \left(\frac{m \cdot RT}{\mu \cdot V} \right)^n, \quad (2)$$

где k – константа скорости окисления алюминия; p_s – общее давление в реакторе; n – порядок реакции; A – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; m – масса воды в реакторе; μ – молярная масса воды; V – объем реактора.

Порядок реакции находили из соотношения скоростей окисления при разных начальных давлениях паров воды в реакторе, но одной температуре:

$$\frac{W_i}{W_j} = \left(\frac{p_{H_2O,i}}{p_{H_2O,j}} \right)^n = \left(\frac{m_{H_2O,i}}{m_{H_2O,j}} \right)^n. \quad (3)$$

Энергию активации находим из соотношения скоростей окисления при одном и том же начальном содержании воды в реакторе и разных температурах:

$$\frac{W_{T_1}}{W_{T_2}} = \frac{k_{T_1}}{k_{T_2}} \cdot \left(\frac{p_{H_2O,T_1}}{p_{H_2O,T_2}} \right)^n = e^{-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^n. \quad (4)$$

Расчеты по уравнениям (2)–(4) дают следующие значения кинетических параметров: $n = 1,7 \pm 0,5$, $E = 36 \pm 11$ кДж/моль, $A = (3,7 \pm 0,8) \cdot 10^{13}$ Па¹⁻ⁿ/(м/с).

В табл. 2 приведены экспериментальные и рассчитанные по уравнению (2) скорости окисления алюминия в зависимости от температуры и общего давления в реакторе.

Таблица 2

**Экспериментальные и рассчитанные по уравнению (2)
скорости окисления алюминия**

Температура, К	Давление, МПа	Скорость растворения Al, мг/м ² ·с		Отклонение, %
		эксперимент	расчет	
673	0,26	1,6	1,5	-7,9
673	0,62	6,1	6,6	8,0
673	1,49	33	30	-8,0
773	2,57	194	181	-6,9
883	0,82	46	50	8,0

Разница между этими величинами не превышает $\pm 8\%$. Систематический сдвиг некоторых графиков, полученных при решении уравнения (2), относительно экспериментальных данных (рис. 1, б, г) объясняется учетом индукционного периода процесса окисления, который не учитывается уравнением (2).

Возможный механизм реакций. Как следует из контрольных опытов, по отдельности ни пары воды, ни хлориды калия и лития не способны разрушить начальную оксидную пленку на алюминии. В результате их взаимодействия, однако, в реакторе образуется сильный окислитель – хлорид водорода (табл. 3):



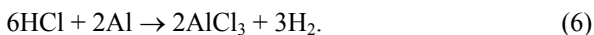
который может вызвать глубокие локальные разрушения оксидной пленки – питтинги [9].

Таблица 3

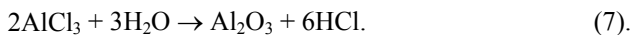
**Константы равновесия возможных химических реакций
в системе Al-H₂O-KCl-LiCl**

Химическая реакция	lgK	
	673 К	883 К
$\text{LiCl} + \text{H}_2\text{O} = \text{LiOH} + \text{HCl}$	-6,41	-5,06
$\text{KCl} + \text{H}_2\text{O} = \text{KOH} + \text{HCl}$	-12,10	-9,43
$6\text{HCl} + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2$	39,13	24,66
$2\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl}$	25,19	22,12
$3\text{H}_2\text{O} + 2\text{Al} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2$		

Через эти разрушения хлорид водорода взаимодействует непосредственно с металлом с образованием водорода и хлорида алюминия



Образующиеся пузырьки водорода скалывают кусочки оксидной пленки вблизи питтинга, увеличивая площадь активной поверхности металла. Для дальнейшего развития этого процесса не требуется новых порций хлорида водорода, поскольку он вновь образуется при гидролизе хлорида алюминия, т. е. процесс носит автокаталитический характер:



Предложенная схема взаимодействия легко объясняет и слабое сцепление оксида алюминия с металлом: его образование происходит не на поверхности металла, а в зоне реакции (7), которая располагается на некотором расстоянии от поверхности металла. Это расстояние будет определяться характеристиками встречных потоков хлорида алюминия и паров воды.

Хлорид водорода в уравнении суммарной реакции (1) отсутствует. На основании этого можно говорить, что он выполняет функции катализатора, поскольку, не расходуясь в процессе взаимодействия, существенно ускоряет реакцию окисления алюминия. Поскольку хлорид водорода обязан своим появлением в реакторе хлоридам калия и лития, можно говорить о каталитическом влиянии этих хлоридов.

Выводы

1. Хлориды калия и лития – продукты разложения окислителей твердого топлива (перхлоратов) могут играть активную роль при окислении алюминия, входящего в состав твердых топлив в качестве горючего. Необходимым условием является присутствие влаги. Скорость окисления алюминия парами воды в присутствии хлоридов калия и лития резко увеличивается, что связано с формированием оксида алюминия не на поверхности металла, а на некотором удалении от нее.

2. Продуктами взаимодействия алюминия с парами воды в присутствии хлоридов калия и лития являются оксид алюминия и водород.

3. Алюминий парами воды в присутствии хлоридов калия и лития окисляется по линейному закону, скорость окисления определяется температурой и общим давлением реакционной смеси и не зависит от парциального давления паров воды. Взаимодействие носит автокаталитический характер.

-
1. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов / пер. с англ. В. А. Алексеева. 2-е изд. М., 1965. 428 с.
 2. Ковалев Д. Ю., Кочетов Н. А., Пономарев В. И. Критерии критического состояния системы Ni-Al при механоактивации // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 4. С. 99–106.
 3. Корчагин М. А., Филимонов В. Ю., Смирнов Е. В., Ляхов Н. З. Тепловой взрыв механически активированной смеси $3\text{Ni} + \text{Al}$ // Физика горения и взрыва, 2010. Т. 46, № 1. С. 48–53.
 4. Рогачев А. С., Кочетов Н. А., Курбаткина В. В., Левашов Е. А., Гринчук П. С., Рабинович О. С., Сачкова Н. В., Бернар Ф. Микроструктурные аспекты безгазового горения механически активированных смесей. Ч. 1: Высокоскоростная микровидео съемка состава Ni+Al // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 4. С. 61–70.
 5. Шевченко В. Г. Влияние легирования на кинетику и механизм окисления порошков сплавов на основе алюминия с редко- и щелочно-земельными металлами // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 2. С. 45–53.
 6. Розенбанд В. И., Афанасьева Л. Ф., Лебедева В. А., Черненко Е. В. Активация хлорным хромом воспламенения Al и его смесей с окислами // Физика горения и взрыва. 1990. № 5. С. 13–15.
 7. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах / отв. ред. акад. М. А. Садовский. М., 1972. 294 с.
 8. Киреев В. А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. 2-е изд., испр. и доп. М., 1975. 536 с.
 9. Улиг Г. Г., Реви Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку технику / пер. с англ. ; под ред. А. М. Сухотина. Л., 1989. 456 с.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ИРИДИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕЛЬНОШТАМПОВАННЫХ ТИГЛЕЙ

А. А. Фомин, Ю. Н. Логинов

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет, Екатеринбург

В работе описаны основные особенности обработки давлением иридия. Также приведены результаты совместной работы специалистов ОАО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов» и УрФУ по разработке технологии изготовления цельноштампованных иридиевых тиглей.

In the present paper main features of iridium forming by pressure are described. The results of joint work of specialists of JSC "Ekaterinburg non-ferrous metals processing plant" and UrFU on the development of solid-drawn iridium crucibles manufacturing technology are also presented.

Благодаря своим уникальным свойствам, таким как жаропрочность и тугоплавкость, сопротивление высокотемпературной коррозии и сопротивление окислению в контакте с оксидными материалами при высоких температурах, иридий нашел широкое применение в областях промышленности, где имеют место быть одновременно высокие температуры вплоть до 2200 °С, воздействие агрессивных химических сред и механическая нагрузка [1]. Однако основной областью применения иридия является его использование в качестве контейнерного материала (тигли) в производстве оксидных монокристаллов.

Иридий из-за сильного упрочнения и склонности к разрушению в поликристаллическом состоянии с трудом поддается механической обработке давлением [1, 2]. Значительное количество научных работ было посвящено выявлению причин разрушения, в частности, выявлено, что оно носит межзеренный характер. В России большую роль в организации этих исследований сыграло сотрудничество Уральского федерального университета и ОАО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов» [3, 4, 5].

В ряде работ отмечается роль фактора анизотропии в описании пластической деформации и характера возможного разрушения [6, 7], а также роль микролегирования и примесей [8, 9, 10]. Холодная деформация иридия не позволяет получить качественные изделия из-за низкой его пластичности при комнатной температуре, что приводит к растрескиванию при относительно небольшой растягивающей деформации. Поэтому обработку иридия давлением проводят при температурах не

ниже 1000 °С. Свойства иридия при высоких температурах изучались в работе [11]. На рис. 1 показаны результаты высокотемпературных испытаний отожженной иридиевой проволоки [12].

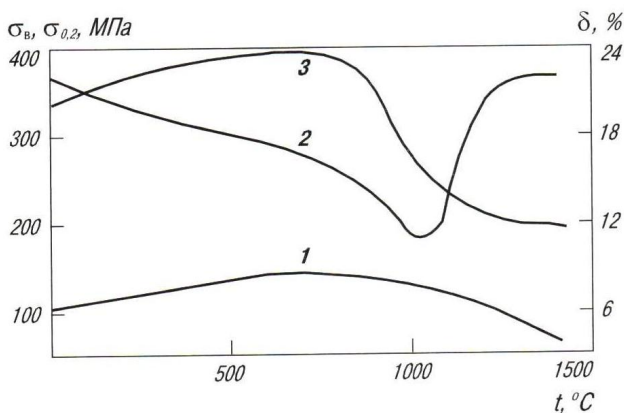


Рис. 1. Зависимости условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (1), предела прочности $\sigma_{\text{в}}$ (2) и относительного удлинения δ (3) от температуры

Целью работы является выявление особенностей обработки иридия в процессе производства тиглей в условиях конкретных технологических возможностей ОАО «ЕЗ ОЦМ». Завод изготавливает цилиндрические или конические сварные тигли диаметром от 20 до 240 мм, высотой от 20 до 240 мм и толщиной стенки от 1 до 4 мм. Однако многолетняя практика показывает, что такие тигли обладают невысоким сроком службы из-за наличия технологических сварных швов: одного продольного на стыке концов обечайки и одного кругового на стыке обечайки и дна (рис. 2).

В 2014 году работники ОАО «ЕЗ ОЦМ» и ООО «ЕЗ ОЦМ – Инжиниринг» (дочернее предприятие ЕЗ ОЦМ) в сотрудничестве с УрФУ начали разработку конструкции и технологии изготовления тиглей с повышенным сроком службы. Первым результатом работы стало получение тигля с цельнотянутым дном из иридия марки И99,9 по ГОСТ 13099-2006 размерами (Д × Т × В) 100 × 1,5 × 100 мм (рис. 3), при этом высота отбортовки дна составила более 10 мм.

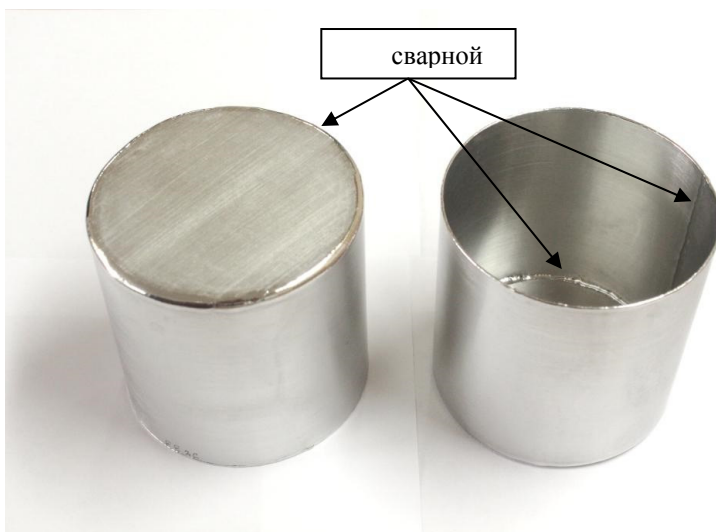


Рис. 2. Цилиндрический сварной иридиевый тигель



Рис. 3. Иридиевый тигель с цельнотянутым дном

Для осуществления контролируемого по температуре деформации процесса горячей вытяжки в интервале температур $1000\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ вытяжную матрицу и детали оснастки, примыкающие к ней, подогрели до температуры $350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы избежать резкого охлаждения заготовки при контакте с матрицей. Для нагрева матрицы и оснастки ис-

пользовали специальную печь, которую устанавливали снаружи оснастки. Листовую заготовку нагревали рядом с прессом до температуры 1300–1350 °С.

При осмотре заготовок (плоские цилиндрические заготовки диаметром $D = 140$ мм и толщиной $S = 1,5$ мм) в микроскопе наблюдались крупные зерна различных размеров с развитыми границами. Боковая поверхность не имела видимых трещин и пор. Процесс глубокой вытяжки осуществлялся с коэффициентом вытяжки 0,7 и относительной толщиной $S/D = 0,0107$, логарифмическая степень деформации 0,35. После экспериментов дно тигля имело размеры: $D = 100,0$ мм и высоту до 20 мм при радиусе закругления 8 мм и не имело трещин в зоне радиусов при визуальном осмотре без увеличения.

Проведенные исследования на оптическом микроскопе подтвердили отсутствие микротрещин в зоне радиального перехода дна (рис. 4, *а*), которые могли бы привести к ускоренному выходу из строя. Также исследования зеренной микроструктуры в этой зоне показали наличие неоднородной структуры, характерной для поликристаллического иридия (рис. 4, *б*).

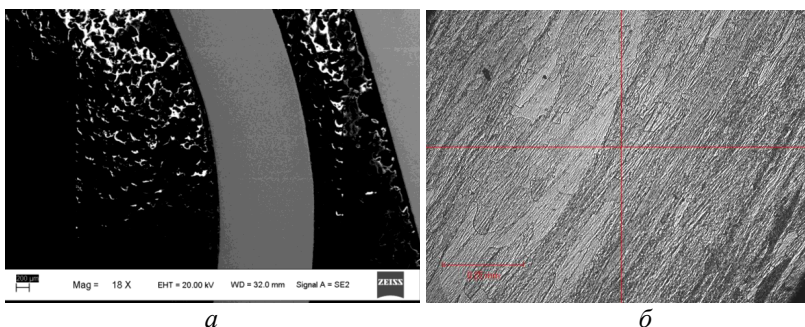


Рис. 4. Результаты исследования цельноштампованного дна:
а – зона радиального перехода под увеличением 18X; *б* – зеренная структура в зоне радиального перехода под увеличением 130X

Следующим этапом совместной научной работы ЕЗ ОЦМ и УрФУ стала разработка технологии изготовления полностью цельноштампованного тигля. Для решения этой задачи с минимальными временными и материальными затратами было принято решение использовать программные комплексы QFORM и PAM-STAMP, моделирующие процессы ОМД [14, 15]. Однако анализ литературных данных показал, что практически все результаты исследований реологических свойств и деформируемости иридия и его сплавов [6, 10, 13] получены при испыта-

ниях на растяжение, которые характеризуются относительно малой деформацией (не более 10–15 %).

Поэтому для начала на основе пластометрических испытаний путем осадки цилиндрических образцов были получены кривые деформационного упрочнения иридия для скорости деформации в пределах $0,2\text{--}20\text{ с}^{-1}$ и температуры в диапазоне $800\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 5). Также была построена аналитическая зависимость сопротивления пластической деформации поликристаллического иридия от степени, скорости и температуры обработки, которая может быть использована при расчете технологических процессов обработки давлением, характеризующихся большими пластическими деформациями.

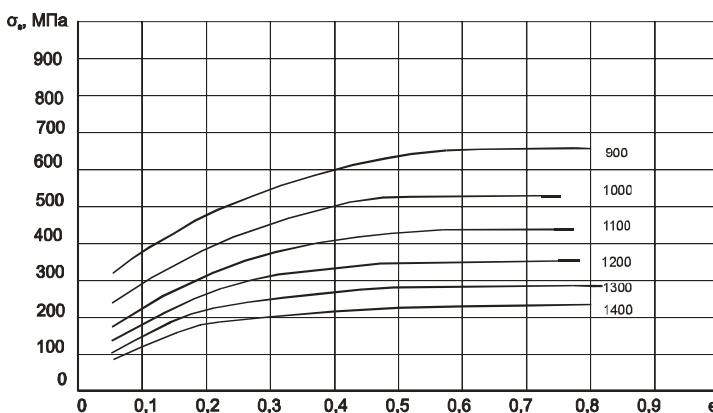


Рис. 5. Опытные кривые упрочнения иридия при осадке со скоростью $0,2\text{ с}^{-1}$ при различных температурах (цифры у кривых)

Изначально был проведен компьютерный анализ процесса штамповки тигля за два перехода с подвижным прижимом. Результаты показали интенсивное охлаждение заготовки в процессе вытяжки, сильное утонение стенки в зоне радиального перехода, а также отсутствие гофр после вытяжки (рис. 6).

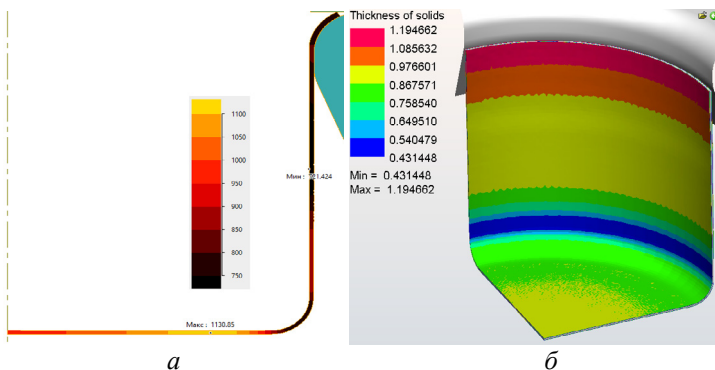


Рис. 6. Результаты первого моделирования:
 а – поле распределения температур по сечению заготовки, °С;
 б – поле распределения толщины заготовки в конце первого перехода, мм

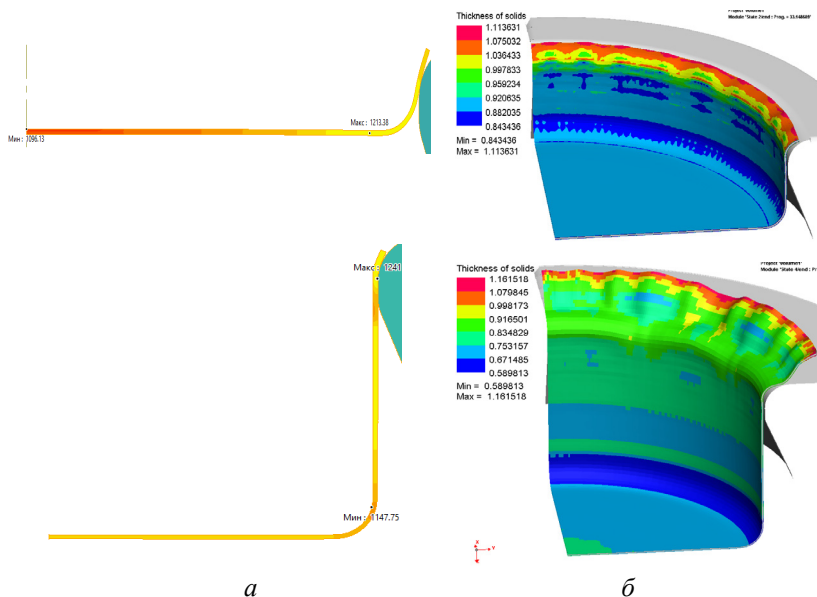


Рис. 7. Результаты второго моделирования:
 а – поле распределения температур по сечению заготовки
 в первом и четвертом переходах, °С;
 б – поле распределения толщины заготовки после второго
 и четвертого перехода вытяжки, мм

Далее был предложен и смоделирован процесс штамповки за 6 переходов без использования прижима. Такая технология позволила устранить остывание заготовки, но появилось гофрообразование, а изменение толщины стенки также осталось значительным (рис. 7).

Наиболее оптимальным был признан вариант вытяжки за один переход с неподвижным прижимом и дополнительным подвижным прижимом, обеспечивающим минимальное охлаждение заготовки и отсутствие гофр на конечном изделии. Результаты моделирования приведены на рис. 8.

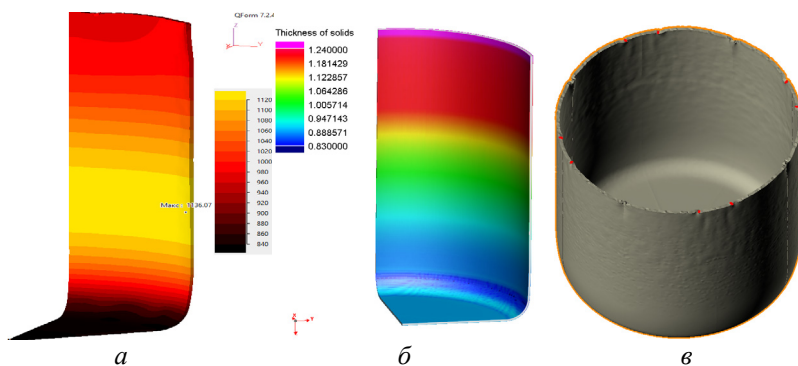


Рис. 8. Результаты третьего моделирования:

a – поле распределения температур по сечению заготовки в конце вытяжки, °C;

б – поле распределения толщины заготовки в конце вытяжки, мм;

в – форма заготовки после вытяжки

Таким образом, результаты работ представителей ОАО «ЕЗ ОЦМ», ООО «ЕЗ ОЦМ – Инжиниринг» и УрФУ показали возможность получения цельноштампованных тиглей высокого качества из поликристаллического иридия методом горячей глубокой вытяжки даже при значительных растягивающих напряжениях, характерных для этого процесса.

1. Тимофеев Н. И., Ермаков А. В., Дмитриев В. А., Панфилов П. Е. Основы металлургии и технологии производства изделий из иридия. Екатеринбург, 1996. 120 с.
2. Hecker S. S., Rohr D. L., Stein D. F. Brittle fracture in iridium // Metall. Trans. A. 1978. Vol. 9, Nr 4. P. 481–488.

3. *Panfilov P., Yermakov A.* Brittle intercrystalline fracture in iridium // *Platinum Metals Review*. 2001. Vol. 45, Nr 4. P. 179–183.
4. *Панфилов П. Е., Ермаков А. В.* Причины хрупкости иридия // *Цветная металлургия*. 2001. Т. 12, № 10. С. 37–38.
5. *Yermakov A., Panfilov P., Adamesku R.* The main features of plastic deformation of iridium single crystals // *J. Mater. Sci. Lett.* 1990. Vol. 9. P. 696–697.
6. *Brookes C. A., Greenwood J. H., Routbort J. L.* The high temperature tensile properties of iridium single crystals // *J. Inst. Metals*. 1970. Vol. 98. P. 27 – 31.
7. *Panfilov P., Novgorodov V., Yermakov A.* Fracture behaviour of polycrystalline iridium under tension in the temperature range 20-1500 °C // *J. Mater. Sci. Lett.* 1994. Vol. 13. P. 137–141.
8. Патент США US7666352. Iridium-based alloy with high heat resistance and high strength and process for producing the same / Патентообладатель JAPAN SCIENCE & TECH AGENCY. Авторы Ishida Kiyohito, Kainuma Ryosuke и др. МПК C22C1/00, C22C5/04. Оpubл. 23.02.2010. Приоритет 09.02.2006.
9. Патент Китая CN102206769. Iridium alloy material and application thereof. Патентообладатель Kunming Fullrolling Technology Dev Co Ltd. Авторы Chuan Zhou, Juquan Xie. МПК C22C30/00, C22C5/04, H01T13/39. Оpubл. 05.10. 2011. Приоритет 11.04.2011.
10. *George E. P., McKamey C. G., Ohriner E. K., Lee E. H.* Deformation and fracture of iridium: microalloying effects // *Mater. Sci. Eng.* 2001. Vol. 319–321. P. 466–470.
11. *Mordike B. L., Brookes C. A.* The tensile properties of iridium at high temperatures // *Platinum Metals Rev.* 1960. Vol. 4, Nr 3. P. 94–99.
12. *Ермаков А. В., Седавных А. В., Гроховская Л. Г.* Изготовление изделий из иридия методами пластической деформации и результаты их эксплуатации // *Цветные металлы*. 2001. № 9–10. С. 49–55.
13. *Ohriner E. K.* Processing of Iridium and Iridium Alloys // *Platinum Metals Review*. 2008. Vol. 52, Nr 3. P. 186–197.
14. *Ershov A. A., Kotov V. V., Loginov Yu. N.* Optimization of the initial form of a semifinished product in PAM-STAMP 2G. 2012. Vol. 56, iss. 3–4. P. 231–235.
15. *Ershov A. A., Loginov Yu. N.* Using the inverse solver "inverse" in PAM-STAMP 2G to assess the formability of a part // *Metallurgist*. 2013. Vol. 57, iss. 5–6. P. 372–377.

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО СОСТАВА РАСТВОРА НА РАЗДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ ЖИДКОСТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ

С. В. Хрускин, О. В. Черемисина, Т. Е. Литвинова

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург

Изучена экстракция гольмия и самария олеиновой кислотой из смешанного ионного состава. Определены технические условия, позволяющие достичь величины фактора разделения гольмия и самария равной 8.

The extraction of holmium and samarium with oleic acid from a mixed ionic composition environment is studied. The technical conditions allowing to achieve the value of separation factor of holmium and samarium equal to 8 are determined.

В последнее время все большее значение и использование в различных сферах деятельности человека приобретают редкоземельные металлы. С каждым годом они получают все большее распространение в ядерной и ветровой энергетике, электронике, технологиях производства композитов и иных материалов. Спрос на редкоземельные материалы будет только расти с развитием высокотехнологических производств.

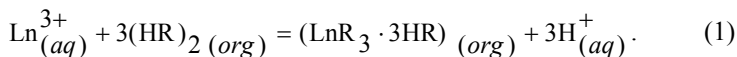
В настоящее время в области добычи редкоземельных металлов лидирует Китай, обладающий практически половиной мировых запасов. За счет грамотной внутренней политики и наличия богатых месторождений лидерство Китая в этой области в ближайшие 10 лет сохранится [1].

В России доля мировых запасов редкоземельных металлов составляет 14 %. Потребность в редкоземельных металлах практически полностью удовлетворяется за счет импорта. Непредсказуемость рынка заставляет искать возможности удовлетворить спрос за счет внутренних ресурсов. В России большая часть руды, содержащей редкоземельные металлы, приходится на апатит-нефелиновые руды, 75 % которых сосредоточено в Хибинских апатитах Кольского полуострова. Ключевая особенность российского сырья заключается в низком содержании редких земель, что делает нерентабельной переработку руд только на редкоземельные металлы. При переработке апатитового сырья они остаются в отвалах и не извлекаются попутно [2].

В современной литературе описывается множество различных методов для разделения суммы РЗМ на группы и индивидуальные составляющие. Классическим методом считается экстракция, в этой области проведено множество исследований. В основном редкоземельные металлы разделяют из нитратных сред с применением таких экстрагентов, как трибутилфосфат (ТБФ), ди-2-этилгексилфосфорной кислоты (Д2ЭГФК). Для восстановления редкоземельной промышленности в России необходимо разрабатывать дешевые и эффективные технологии разделения редкоземельных металлов и включать в переработку низкокачественное и техногенное сырье. Для разложения такого сырья обычно применяют соляную и серную кислоты как более дешевый реагент, что не позволяет использовать классические решения с трибутилфосфатом [3, 4].

Результаты многолетних исследований экстракции редкоземельных и цветных металлов с помощью карбоновых кислот свидетельствуют о том, что эта группа экстрагентов не менее эффективна, чем ТБФ для извлечения редкоземельных металлов и их отделения от сопутствующих элементов. Экстракция карбоновыми кислотами протекает по катионообменному механизму.

Для экстракции редкоземельных металлов катионообменными экстрагентами, в том числе карбоновыми кислотами, характерно снижение степени извлечения от лантана к лютецию. При сохранении мольного соотношения экстрагент/металл не менее 10 и соотношения водной и органической фазы не более 1 процесс экстракции принято описывать следующим уравнением [5]:



Согласно реакции (1) основным фактором, влияющим на извлечение РЗМ карбоновыми кислотами, является значение pH и доля лантаноида в форме простого катиона $\text{Ln}^{3+}_{(aq)}$. При проведении экстракции из слабых кислотных сред (pH не более 3) требуется повышенный расход экстрагента. Для извлечения редкоземельных металлов из растворов, образующихся при переработке бедного или техногенного сырья, целесообразно снижать расход экстрагента [3].

Целью работы является изучение извлечения редкоземельных металлов олеиновой кислотой из хлорид-нитратных сред. Было предположено, что присутствие хлорид-ионов в нитратной системе может изме-

нить коэффициенты извлечения и распределения за счет индивидуального влияния на извлечение компонентов.

Для моделирования растворов, бедных по содержанию целевого компонента, исходную концентрацию гольмия и гадолиния задали равной 0,01 моль/л. Экстракцию проводили 0,5 М раствором олеиновой кислоты в инертном растворителе (ксилол марки х.ч.). Средняя молярная масса олеиновой кислоты составила 282,5 г/моль, брутто-формула $C_{18}H_{34}O_2$, средняя константа диссоциации характеризуется величиной $pK_d = 5,9$. Мольное соотношение олеиновая кислота – катион РЗМ было выбрано согласно стехиометрии (1). Экстракция проводилась при $pH = 5$, так как в этом случае достигалась наибольшая степень извлечения. Необходимое значение pH задавалось гидроксидом натрия марки х.ч., концентрация хлорид-иона задавалась внесением необходимого количества хлорида калия марки х.ч., концентрация нитрат-иона была постоянной и равной 0,05 моль/л. Контакт фаз осуществляли при помощи Parallel Auto-MATE® Reactor System производства компании HEL с автоматическим поддержанием заданного значения pH . Расслаивание фаз выполнено на центрифуге производства Koehler K61002.

Анализ концентрации ионов лантаноидов в водном растворе до и после экстракции выполнен методом комплексонометрического титрования трилоном Б в присутствии индикатора с арсеназо (III) при помощи автоматического титратора Mettler Toledo T70 с фоточувствительным электродом Mettler Toledo DP 5 Phototrode. Анализ содержания хлорид-иона выполнен методом прямой потенциометрии с хлорид-селективным электродом при помощи иономера Mettler Toledo T70.

Содержание лантаноида в органической фазе рассчитано по разности концентраций в водном растворе до и после экстракции с учетом соотношения объемов фаз:

$$C_{org} = \frac{(C_0 - C_{aq})}{\alpha}, \quad (2)$$

где C_{org} и C_{aq} – концентрация лантаноида в экстракте и равновесной водной фазе соответственно, моль/л; C_0 – исходная концентрация РЗМ в водном растворе, моль/л; α – соотношение объемов органической V_{org} и водной V_{aq} фаз, в условиях эксперимента $\alpha = 0,1$.

Коэффициент распределения вычислен по уравнению

$$D = \frac{C_{org}}{C_{aq}}, \quad (3)$$

Коэффициент разделения соответствующих лантаноидов вычислен по уравнению

$$K_{2/1} = \frac{D_2}{D_1}, \quad (4)$$

где индекс 2 присвоен лучше экстрагируемому элементу.

Проведенный эксперимент показал нелинейное изменение коэффициентов распределения гадолиния (рис. 1) и гольмия (рис. 2) в зависимости от концентрации хлорида калия с четко выраженным пиком.

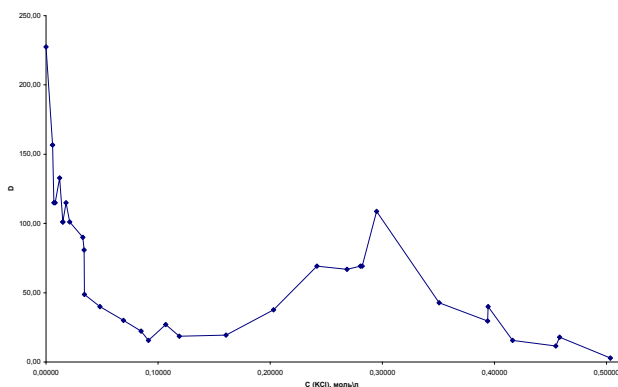


Рис. 1. Зависимость коэффициента распределения гадолиния от концентрации хлорида калия

Анализ водной фазы после экстракции показал, что концентрация хлоридов постоянна. Характер коэффициента распределения зависит от соотношения концентраций хлоридных комплексов и катионов 3+ лантаноидов. При уменьшении содержания хлоридных комплексов, например, при усилении гидролиза, коэффициент распределения увеличивается, что связано с участием в экстракционном равновесии простых катионов лантаноидов или их моногидрохсокомплексов [6].

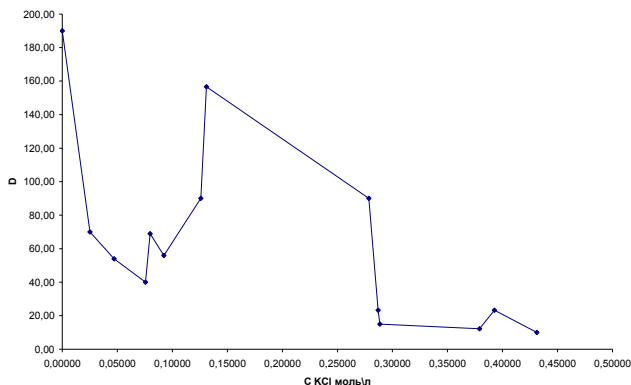


Рис. 2. Зависимость коэффициента распределения гольмия от концентрации хлорида калия

На основе этого эффекта можно увеличить коэффициенты разделения, например, для пары гадолиний – гольмий (рис. 3). Резкое увеличение коэффициента разделения на узком диапазоне концентраций 0,12–0,15 позволяет эффективно отделить один элемент от другого.

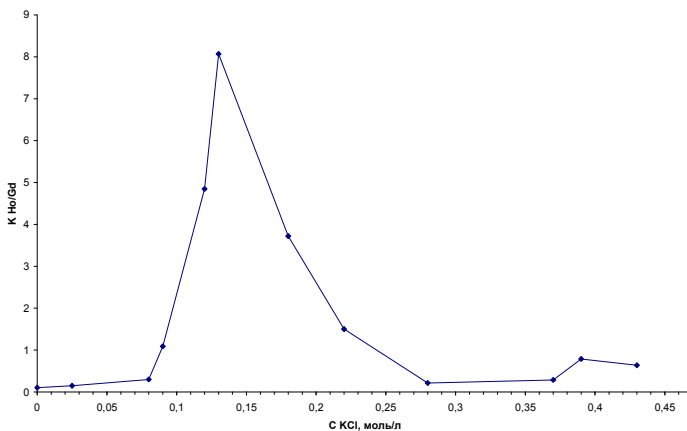


Рис. 3. Зависимость коэффициента разделения от концентрации хлорида калия

Использование хлоридных добавок в процессе экстракции позволит увеличить эффективность использования олеиновой кислоты как экстрагента с целью разделения близких по свойству редкоземельных металлов.

-
1. *Фолджер Т.* Семнадцать элементов : редкоземельные металлы // National geographic. 2011 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nat-geo.ru/science/35069semnadtsat-elementov-redkozemelnye-metally> (дата обращения: 15.05.2015).
 2. Редкоземельные металлы // Информационно-аналитический центр минерал. 2008. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mineral.ru/Facts/russia/131/293/index.html> (дата обращения: 15.05.2015).
 3. *Flett D. S., Jaycock M. J.* Extraction of metals by carboxylic acids // Solvent Extraction and Ion-exchange. 1973. Vol. 3. P. 234–241.
 4. *Miller F.* Carboxylic acids as metal extractants // Talanta Rev. 1974. Vol. 21. P. 685–703.
 5. *Михайличенко А. И., Михлин Е. Б., Патрикеев Ю. Б.* Редкоземельные металлы. М., 1987.
 6. *Хрускин С. В., Литвинова Т. Е., Черемисина О. В., Луцкий Д. С.* Экстракция эрбия и самария из сред смешанного ионного состава // Естественные и технические науки. 2015, Т. 4. С. 209–217.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки России по проекту № 4.982.2014/К «Развитие термодинамической и кинетической теории межфазного ионного обмена применительно к природным и промышленным объектам» от 11 июля 2014 г.

О ПЛАЗМЕННОМ СИНТЕЗЕ НАНОПОРОШКА КАРБОНИТРИДА ХРОМА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СВОЙСТВ

Л. С. Ширяева, И. В. Ноздрин, Г. В. Галевский

Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк

Разработаны научные и технологические основы плазменного синтеза карбонитрида хрома, включающие анализ современного состояния производства и применения хром-углеродных соединений, определение характеристик трехструйного плазменного реактора, модельно-математическое исследование взаимодействия сырьевого и плазменного потоков, прогнозирование технологических показателей плазменного на основе результатов моделирования, выбор оптимального технологического варианта, реализацию плазмометаллургической технологии производства карбонитрида хрома, его физико-химическую аттестацию и определение технико-экономических показателей производства.

Investigated the scientific and technological bases of plasma synthesis of chromium nanocarbide, including analysis of the current state of production and use of chromium-carbon compounds, the characterization of three-jet plasma reactor, the model-a mathematical study of the interaction of raw and plasma flows, forecasting techno-logical parameters of the plasma synthesis based on simulation results and the choice of optimal technology option, the implementation of plasma metallurgical technology chromium carbide, its physic-chemical certification and determination of technical and economic indicators of production.

Близкий по составу и структуре к карбонитриду хрома $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,80}\text{N}_{0,20})_2$ карбид Cr_3C_2 – износо- и коррозионностойкий, твердый, химически инертный материал – востребован в современной технике и технологиях для изготовления защитных покрытий металлов и керметов, в качестве компонентов и легирующих добавок безвольфрамовых твердых сплавов. Анализ современного состояния отечественного и мирового производства и применения карбида хрома показывает, что можно выделить три группы способов его получения с точки зрения агрегатного состояния сырья и основных областей применения: карботермическое восстановление оксида хрома в насыпном или компактированном виде в неокислительной атмосфере (N_2 , H_2 , вакуум, инертный газ); карботер-

мическое восстановление оксида хрома в расплаве; карботермическое восстановление оксида хрома в газовой фазе. Карбид хрома, полученный способами первой группы, применяется в порошковой металлургии в технологии керметов, второй – для напыления и наплавки защитных покрытий, третьей – в наноматериалах. Дальнейшие перспективы применения карбида хрома связаны с производством его в наносостоянии. Разработанная и освоенная в 80-х годах в рамках комплексной научно-технической программы государственного значения «Сибирь» под руководством академика РАН М. Ф. Жукова и профессора Г. В. Галевского технология плазмометаллургического синтеза относится к третьей группе способов получения карбида хрома и реализуется с использованием трехструйного прямоточного плазменного реактора мощностью до 50 кВт и азота в качестве плазмообразующего газа. Реализация предлагаемой плазмометаллургической технологии в полной мере делает ее экологически безопасной, обеспечивающей получение нанокарбида хрома, близкого по составу к стехиометрическому, в виде нанопорошков с размером частиц 30–70 нм и возможность выделения в товарном виде нанодисперсного пиролитического углерода и продукта улавливания цианистого водорода – технического цианида натрия. Наряду с достоинствами в данной технологии имеются такие недостатки, как техническая и экономическая нецелесообразность использования в качестве карбидизатора пропан-бутановой смеси, требующей для переработки сложной по составу и генерации азотно-аммиачно-водородной плазмы, а также лабораторный уровень реализации.

Целью работы является создание научных и технологических основ плазменного синтеза карбонитрида хрома и его физико-химическая аттестация.

В настоящее время в Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ) накоплен значительный опыт исследования и эксплуатации трехструйного прямоточного плазменного реактора с работающими на азоте электродуговыми плазмотронами и применения его для синтеза тугоплавких карбидов, боридов, их композиций, обобщенный в работах [1–3]. Показано, что оптимальной следует считать конструкцию реактора с равномерным расположением плазмотронов по окружности, с углом наклона плазменных струй к оси реактора 30–45° и тепловой защитой интенсивно охлаждаемых стенок, обеспечивающую оптимальный режим работы камеры смешения, высокую равномерность радиального распределения температуры и скорости при минимальных потерях тепловой энергии. Однако описанные в [1–3] результаты получены для лабораторного плазменного реактора мощностью 30–50 кВт, не содержат проектно-технологических предложений и рекомендаций

по выходу на промышленный уровень и полной информации о его теплотехнических и технологических характеристиках.

Для определения промышленного уровня мощности трехструйного реактора проведено его теплотехническое обследование в диапазоне мощности 80–250 кВт, включающее определение теплового КПД плазмотронов, достигаемой удельной энтальпии плазменного потока на входе в реактор, массового расхода генерируемого в этих условиях плазмообразующего газа. Установлено, что сочетание теплового КПД, требуемой удельной энтальпии плазмообразующего газа и его массового расхода, близкое к оптимальному, достигается при мощности реактора 150 кВт. Дальнейшее повышение уровня мощности нецелесообразно, поскольку при возможном конструктивном выборе плазмотронов не обеспечивается требуемая удельная энтальпия плазменного потока. Для трехструйного реактора с внутренним каналом диаметром 0,054 м и мощностью 150 кВт среднemasовая температура плазменного потока на длине 12 калибров изменяется в пределах (5500÷2650) К для нефутерованного канала и (5500÷3200) К при теплоизоляции его цилиндром из диоксида циркония толщиной 0,005 м; при этом температура внутренней поверхности изменяется в пределах (800÷350) К и (1900÷850) К соответственно. Удельная электрическая мощность достигает 1214 МВт/м³, что значительно превышает этот показатель для традиционного электротермического оборудования (обычно около 0,2 МВт/м³). Расчетный ресурс работы электродов составляет для медного анода 4700, вольфрамового катода 111 часов. Прогнозируемое загрязнение карбида хрома продуктами эрозии электродов не превышает 0,0001 % меди и 0,00002 % вольфрама. По совокупности характеристик трехструйный плазменный реактор мощностью 150 кВт может быть отнесен к высокоэффективному, надежно работающему современному электротермическому оборудованию.

Модельно-математическое исследование взаимодействия сырьевого и плазменного потоков включало проведение термодинамического и кинетического анализов. В связи с использованием в процессах синтеза в качестве хромсодержащего сырья – хрома, оксида Cr_2O_3 и трихлорида CrCl_3 , углеводородного сырья – метана и плазмообразующего газа – азота объектами исследования являлись системы C–H–N, Cr–O–C–H–N, Cr–Cl–C–H–N, Cr–C–H–N.

Термодинамический анализ процессов синтеза проведен с целью прогнозирования оптимальных параметров получения карбида хрома (соотношения компонентов и температуры), определения для квазиравновесных условий, исключающих присутствие конденсированного углерода, показателей процесса (степени превращения сырья в карбид,

составов газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы карбидообразования газозфазных реакций, обеспечивающих в условиях плазменных технологий эффективную переработку дисперсного сырья. Необходимые для анализа составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались «константным» методом, основанном на совместном решении уравнений закона действующих масс, материального баланса, суммарного числа молей газовой смеси, существования конденсированной фазы, закона Дальтона с использованием программы компьютерного моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий PLASMA (ИХТТИМ СО РАН), имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридообразующих систем [4, 5]. При расчетах рассматривалась область температур 1000–6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа. Термодинамический анализ выбранных технологических вариантов показал, что в системах $\text{Cr}:\text{O}:\text{C}:\text{H}:\text{N}$ и $\text{Cr}:\text{C}:\text{H}:\text{N}$ 100 % выход карбида хрома возможен при стехиометрических соотношениях $\text{Cr}:\text{C}$ и $\text{C}:\text{H}$ и температуре 2000–2200 К. В системе $\text{Cr}-\text{C}-\text{Cl}-\text{H}-\text{N}$ 100 % выход карбида хрома достигается при стехиометрическом соотношении $\text{Cr}:\text{C}$, 3-кратном избытке водорода и температуре 2000–2200 К. Образование карбида хрома происходит с участием конденсированного хрома и циановодорода по механизму «пар – расплав – кристалл», что позволяет предположить возможность достижения его высокого выхода в реальных условиях синтеза.

Многовариантное модельно-математическое исследование макрокинетических параметров испарения дисперсного хромсодержащего сырья проведено с использованием усовершенствованной математической модели взаимодействия плазменного и сырьевого потоков А. Л. Моссэ – И. С. Бурова – Г. В. Галевского, основанной на совместном решении уравнений движения частиц сырья, межкомпонентного теплообмена и теплообмена плазменного потока со стенками реактора и учитывающей влияние на интенсивность теплообмена дисперсного сырья и искусственной теплоизоляции канала [6].

Для взаимодействия дисперсного хромсодержащего сырья с высокотемпературным потоком газа в плазменном реакторе рассчитана степень испарения сырья в зависимости от энергетических параметров реактора, крупности, скорости ввода в плазменный поток и массовой расходной концентрации. При подводимой к реактору мощности 75 кВт 100 % степень испарения для частиц хрома крупностью 10...30 мкм при массовой расходной концентрации 0,14...0,12 кг порошка хрома / кг газотеплоносителя. Для оксида хрома (III) и хлорида хрома (III) эти показатели составляют соответственно 5...20 мкм и 0,14...0,10 кг/кг, 30...70

мкм и 0,16...0,14 кг/кг. На основании полученных результатов выбраны сырьевые материалы для синтеза карбида хрома.

Результаты модельно-математического исследования позволили спрогнозировать технологические показатели плазмотехнологического производства карбида хрома для различного вида хромосодержащего сырья и выбрать оптимальный технологический вариант (табл. 1). При расчете показателей учитывались потери сырья в реакторе в количестве 4 % и потери продуктов синтеза в системе улавливания в количестве 5 %. Можно видеть, что оптимальным технологическим вариантом является карбидизация хрома природным газом.

Технологические исследования проводились в условиях НПФ «Полимет» на базе промышленного плазмотехнологического комплекса мощностью 150 кВт, подробно описанного в [7] и включающего трехструйный прямоточный плазменный реактор, системы электро-, газо-, водоснабжения, дозирования шихтовых материалов и улавливания продуктов синтеза. Для генерации плазменного потока в реакторе используются три электродуговых подогревателя (плазмотрона) ЭДП-104А мощностью до 50 кВт каждый, установленные в камере смешения под углом 30° к оси реактора. Камера смешения соединена с секционированным водоохлаждаемым каналом, имеющим внутренний диаметр 0,064 м. Для снижения радиального градиента температуры в пристеночной зоне реактор футерован цилиндрическими вставками из диоксида циркония с толщиной стенки

Таблица 1

Прогнозируемые технологические показатели плазмотехнологического производства карбида хрома

Показатели процесса	Технологические варианты		
	Карбидизация хрома метаном	Восстановление Cr_2O_3 метаном	Восстановление CrCl_3 метаном
Степень превращения сырья	0,95	0,95	0,95
Выход карбида хрома, %	92,0	90,0	91,8
Производительность по карбиду хром, кг/ч	3,42	2,79	1,69
Интенсивность производства, кг/ч·м ³	1368	1116	676
Расход хромосодержащего сырья, кг/кг	0,9	1,3	2,76
Расход газа-теплоносителя, кг/кг	9,47	11,6	19,7
Расход метана, кг/кг	0,175	0,58	0,18
Расход эл. энергии, кВт·ч /кг	65,79	80,65	133,14

0,005 м и наружным диаметром 0,064 м, уменьшающими диаметр его канала до 0,054 м. Изменение длины реактора и подача в плазменный поток холодного газа (азота) через закалочное кольцо, устанавливаемое на выходе из реактора, позволяют проводить закалку продуктов синтеза в различных температурных зонах. Подача высокодисперсного сырья в камеру смешения осуществляется с помощью водоохлаждаемой фурмы.

Электропитание промышленного плазменного реактора осуществляется от тиристорного преобразовательного агрегата серии АТП-750/600. Для дозирования порошкообразного сырья применяется дозатор смешанного электромеханического и газовихревого типа периодического действия со съёмным цилиндром – приемником порошкообразного сырья. Система улавливания продуктов синтеза включает осадительную камеру, где улавливается до 10 % нанопорошка и температура технологических газов снижается до 873 К, и двух работающих поочередно рукавных фильтра, улавливающих до 85 % нанопорошков.

В качестве плазмообразующего газа использовался азот технической чистоты с содержанием кислорода до 0,5 % об., хромсодержащего сырья – хром металлический марки ПХ-1М (ТУ 14-1-1474-75, изм.), карбидизатора – природный газ с содержанием метана до 94 % об. (остальное – этан, пропан, бутан).

Технологические исследования проводились с привлечением метода планируемого эксперимента, что позволило найти зависимости содержания в продуктах синтеза близкого по составу к карбиду карбонитрида хрома и сопутствующих ему примесей от определяющих факторов в виде следующих уравнений:

$$[Cr_3(C_{0,8}N_{0,2})_2] = 66,12 + 0,03T_0 - 0,42C_{H_2} - 0,14C_{NH_3} - 0,00002T_3 \cdot C_{NH_3} \quad (1)$$

$$[Cr_{своб.}] = 147,95 - 0,027T_0 - 0,34C_{H_2} - 1,37C_{NH_3} + 0,0003T_0 \cdot C_{NH_3} \quad (2)$$

$$[C_{своб.}] = -150,30 - 0,002T_0 + 1,3C_{H_2} + 13,5C_{NH_3} - 0,00008T_0 \cdot C_{NH_3} + 0,0002T_3 \cdot C_{H_2} \quad (3)$$

$$[Cr_2O_3] = 41,80 - 0,0069T_0 - 0,208C_{CH_4} + 0,00004T_0 \cdot C_{CH_4} \quad (4)$$

$$[N_{связ.}] = 1,74 + 0,001T_0 - 0,012C_{H_2} - 0,03C_{NH_3} - 0,00001T_3 \cdot C_{NH_3}, \quad (5)$$

где $[Cr_3(C_{0,8}N_{0,2})_2]$, $[Cr_{своб.}]$, $[C_{своб.}]$, $[Cr_2O_3]$, $[N_{связ.}]$ – содержание, в %

масс., в продуктах синтеза карбонитрида, свободных хрома и углерода, оксида хрома (III) и связанного азота; T_0 и T_3 – начальная температура плазменного потока и температура закалки, К; C_{CH_4} – количество углеводорода от стехиометрически необходимого для карбидизации хрома, %; C_{H_2} – концентрация водорода в плазмообразующем газе, % об.; C_{NH_3} – количество атомарного азота в плазмообразующем газе, $N(NH_3) / C(CH_4)$, % от стехиометрического.

При этом средний размер формирующихся в плазменном потоке частиц карбонитрида хрома, рассчитанный по величине удельной поверхности, пропорционален среднемассовой температуре потока в степени – 2,96 (уравнение (6)):

$$\bar{d} = (726 \pm 35,1) T^{(-2,96 \pm 0,436)}. \quad (6)$$

Оптимальные значения технологических факторов и допустимые пределы их изменения, а также основные характеристики синтезируемого при этих условиях карбонитрида хрома, полученные при пятикратном дублировании опытов, приведены в табл. 2.

Для комплексной физико-химической аттестации продуктов синтеза методами рентгеновского и химического анализов исследовались кристаллическая решетка, фазовый и химический составы, а методами просвечивающей (ПЭМ) и растровой (РЭМ) электронной микроскопии – дисперсность и морфология частиц.

Установлено, что продуктом плазменного синтеза является тройное соединение – карбонитрид хрома. $Cr_3(C_{0,80}N_{0,20})_2$, идентифицированный как ромбический карбонитрид с кристаллической структурой, отличающейся от структуры карбида наличием октаэдрических структурных элементов, внутри которых расположены атомы азота. В исследуемом диапазоне изменения параметров синтеза состав карбонитрида хрома практически не меняется и в пределах точности анализа и расчета соответствует $Cr_3(C_{0,80}N_{0,20})_2$. Содержание в продуктах синтеза нанокарбонитрида хрома составляет 91,8–93,5 % масс. Микрофотографии нанокарбонитрида хрома приведены на рисунке.

Нанопорошок карбонитрида хрома представлен агрегатами шарообразной или близкой к ней формы размером от 600 до 150 нм, образованными сообществом глобулярных частиц достаточно широкого размерного диапазона – от 20 до 80 нм, число которых в агрегате зависит от его крупности. Наноуровень и морфология частиц позволяют рассматривать их как продукты науглероживания микрокапель хрома, образующихся при объемной конденсации его паров, жидкокапельной коалесценции и кристаллизации, а присутствие в исследуемых объектах агре-

готов различного объема указывает на высокую вероятность дальнейшего укрупнения наночастиц при понижении температуры путем их коагуляции.

Таблица 2

Допустимые пределы изменения параметров синтеза карбонитрида хрома в промышленном реакторе мощностью 150 кВт и его основные характеристики

Параметры синтеза и характеристики карбонитрида хрома	Значение
Состав газа-теплоносителя, % об. – азот	100
Состав карбидизатора, % об.	
– метан	93,6
– этан	3,0
– пропан	2,2
– бутан	1,2
Состав хромсодержащего сырья, % масс.	
– хром металлический	99,3
Крупность хромсодержащего сырья, мкм	–10
Производительность по сырью, кг/ч	3,11
Количество карбидизатора, % от стехиометрического	120–140
Начальная температура плазменного потока, К	н.м. 5400
Температура закалки, К	2000÷2200
Фазовый состав	$\text{Cr}_3(\text{C}_{0,80}\text{N}_{0,20})_2$
Химический состав, % масс.	
– $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,80}\text{N}_{0,20})_2$	91,8–93,45
– хром свободный	2,10–1,80
– углерод свободный	1,30–1,10
– оксид хрома (III)*	4,00–3,00
– летучие	0,80–0,60
Выход карбонитрида хрома, % масс.	92,0
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$	32000–37000
Размер** частиц, нм	30–35
Форма частиц	шаровидная
Окисленность нанопорошка карбонитрида хрома*** $\times 10^7$, кг $\text{O}_2/\text{м}^2$	2,56
Производительность, кг/ч	3,42
Интенсивность, $\text{кг}/\text{ч}\cdot\text{м}^3$	1368

* Определялось по содержанию кислорода.

** Рассчитывался по величине удельной поверхности.

*** Определялась после выдержки на воздухе в течение 24 ч.

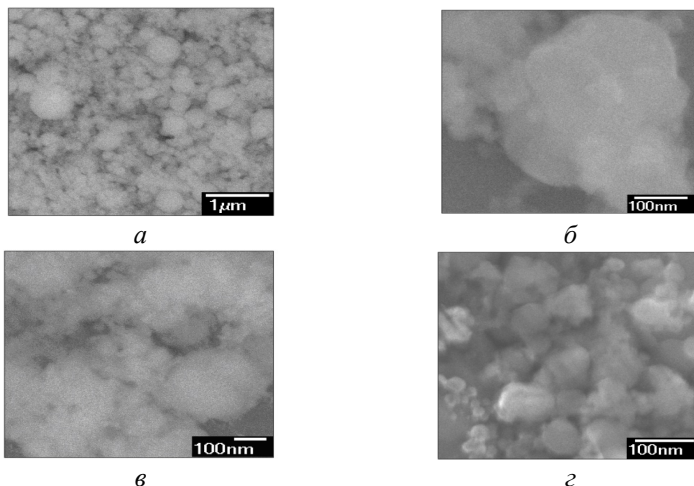


Рис. 1. Микрофотографии нанокарбонитрида хрома – РЭМ:
а – внешний вид; *б* – морфологическая картина агрегата; *в* – ансамбль частиц и агрегатов; *г* – отдельные частицы

Оценка экономической эффективности плазмометаллургического производства карбонитрида хрома показывает, что при объеме производства 3,7 т карбонитрида хрома в год (в расчете на 1 реактор) и себестоимости 2869 тыс. руб./т отпускная цена составляет 13000 руб./кг, что свидетельствует о его конкурентоспособности на мировом рынке нанопорошковых материалов. В настоящее время ведущими зарубежными производителями нанопорошков карбидов, среди которых научно-производственные фирмы Nanostructured & Amorphous Materials. Inc. (США), Tokyo Tekko Co (Япония), Hefei Nanotechnology & Development htd. Co (Китай), Neomat Co (Латвия), Plasma Chem Gmbh (Германия) установлен диапазон цен на нанопорошки карбидов в пределах 24000–100000 руб./кг. Срок окупаемости капиталовложений составляет 1,5 года, что подтверждает экономическую и технологическую целесообразность организации производства карбонитрида хрома. При этом одной из наиболее предпочтительных сфер применения карбонитрида хрома является технология композиционного электроосаждения защитных покрытий [8].

Выводы

На основании проведенных модельно-математических и технологических исследований определены оптимальные значения параметров синтеза нанокарбида хрома и его физико-химические характеристики.

Установлено, что при карбидизации порошка хрома метаном в условиях плазменного потока азота в области температур 5400–2000 К образуется карбонитрид хрома состава $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$. Исследованы фазовый и химический составы, дисперсность, морфология и окисленность продуктов синтеза. Определены такие основные технико-экономические показатели предлагаемой технологии, как производительность, интенсивность, себестоимость, отпускная цена.

1. Галевский Г. В., Жуков М. Ф., Корнилов А. А., Ноздрин И. В., Гусев А. А. Гидродинамические и теплотехнические характеристики трехструйного прямоточного реактора для высокотемпературного синтеза тонкодисперсных материалов. Новосибирск, 1990. 40 с.

2. Руднева В. В. // Вестн. РАЕН: Проблемы развития металлургии в России. 2006. Т. 6, № 3. С. 18–30.

3. Галевский Г. В., Руднева В. В., Полях О. А. Технология плазмометаллургического производства наноматериалов. Т. 1: Основы проектирования плазмометаллургических реакторов и процессов. М., 2008. 228 с.

4. Ноздрин И. В., Ширяева Л. С. Термодинамический анализ процессов плазменного синтеза карбида хрома // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 3–7.

5. Ноздрин И. В., Галевский Г. В., Руднева В. В. // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии : тр. 3-й Всерос. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2011. С. 60–64.

6. Ноздрин И. В., Руднева В. В., Ширяева Л. С., Терентьева М. А. Модельно-математическое исследование условий эффективной переработки хромосодержащего сырья в плазменном реакторе // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. 2012. № 2. С. 13–18.

7. Руднева В. В., Юркова Е. К. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния. Доп. т.: Плазменный синтез и компактирование нанокарбида кремния. Новокузнецк, 2011. 241 с.

8. Полях О. А., Руднева В. В. Плазмометаллургическое производство карбида кремния для композиционного никелирования и хромирования. М., 2006. 188 с.

Работа выполнена в СибГИУ в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России № 11.1531.2014/К.

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНЫ В ТИТАНО-СТАЛЬНОМ КОМПОЗИТЕ

В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, Р. Е. Новиков

Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград

Исследовано влияние температурно-временных условий нагрева сваренного взрывом композита титан ВТ1-0+сталь 20 на фазовый состав диффузионной прослойки, формирующейся на его межслойной границе. Показано, что после нагрева до 800 °С она состоит из $\alpha+\alpha'$ -Ti, твердого раствора железа в титане и обезуглероженной зоны. При нагреве в интервале температур 900–1000 °С ее состав: игольчатая $\alpha+\alpha'$ -Ti структура, интерметаллиды Fe_2Ti и $FeTi$, карбид титана TiC , твердый раствор титана в α -Fe и обезуглероженная зона.

Investigated the influence of temperature and time conditions of heating the composite titanium ВТ1-0 + steel 20 welded by means of explosion on phase composition of diffusion layer forming on the interlaminar boundary. There was shown that after its heating to 800 °C it consists of $\alpha+\alpha'$ -Ti, solid solution of iron in titanium and decarbonized area. When it is heated at the temperature range 900 - 1000 °C, its composition is the following one: acicular $\alpha+\alpha'$ -Ti structure, intermetallics Fe_2Ti and $FeTi$, titanium carbide TiC and solid solution of titanium in α -Fe and decarbonized area.

Быстротечность сварки взрывом ограничивает процесс образования соединения двумя стадиями: созданием физического контакта и химическим взаимодействием, при котором успевает протекать только электронное взаимодействие контактирующих металлов. Диффузионные же процессы подавляются, не успев развиваться [1]. По этой причине в сваренных на оптимальных режимах титано-стальных соединениях отсутствуют хрупкие фазы и реализуется равнопрочность основному металлу. Превышение режимов над оптимальными приводит к образованию в зоне соединения оплавленных участков твердостью $H_{50} = 900$ МПа, состоящих из интерметаллида Ti-Fe и твердого раствора β -Ti с параметрами решетки соответственно 2,98 и 3,16 Å (иногда в них выявляется и интерметаллид $TiFe_2$), химический состав которых колеблется в пределах 33–35% Fe и 67–65% Ti. Увеличение их количества за счет варьирования тремя основными параметрами V_K , V_c и m_c снижает прочность сварного соединения [2, 3].

Тем не менее даже в том случае, если сварное соединение качественное, в процессе последующих технологических или эксплуатационных нагревов (выше 600 °С) оно может потерять работоспособность в результате образования на границе раздела металлов диффузионной зоны (ДЗ). После нагревов при 700–1000 °С прочность соединений Ti со сталями практически падает до нуля вследствие возникновения в этой зоне микротрещин и нарушения когерентного соответствия между кристаллическими решетками матрицы исходных фаз и ДЗ [4].

В настоящей работе исследован процесс формирования ДЗ, определен ее фазовый состав и химический состав структурных составляющих.

При проведении исследований применялось следующее оборудование: рентгеновский дифрактометр ДРОН-3, микротвердомер ПМТ-3М, вакуумная печь СВШЛ 0,6-2/16, материаловедческий агрегатный микроскоп Olympus BX61, сканирующий электронный микроскоп Versa 3D Dual Beam.

При исследовании микроструктуры титано-стальных соединений состава титан ВТ1-0+сталь 20 установлено, что в процессе их нагрева до температур выше 800 °С образуется многослойная ДЗ (рис.1). После термообработки при 1000 °С в течение 10 часов она состоит из пяти слоев (рис. 1, *е*).

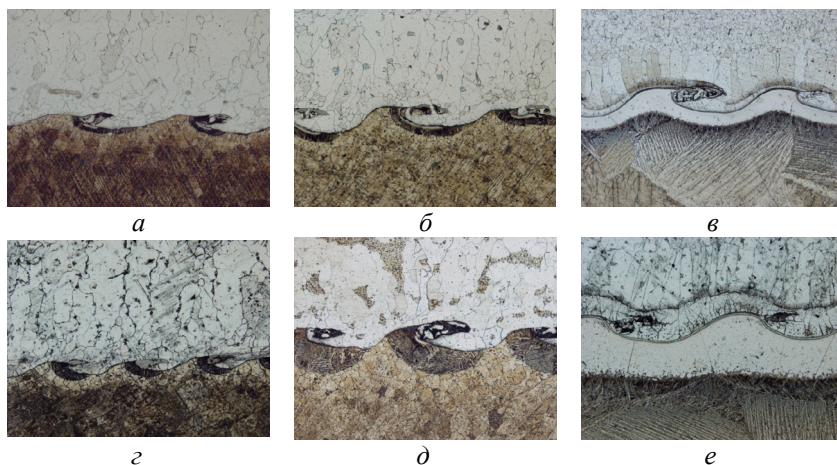


Рис. 1. Микроструктура зоны соединения ВТ1-0 – сталь 20 после термообработки при температурах (*а, г* – 750; *б, д* – 850; *в, е* – 1000 °С) и времени выдержки (*а, б, в* – 1; *г, д, е* – 10 часов) ($\times 100$)

При сопоставлении данных, полученных с помощью дифрактометра ДРОН-3 и растрового двухлучевого электронного микроскопа системы

Versa 3D (рис. 2), установлено следующее. На границе раздела образуется прослойка белого цвета, состоящая из интерметаллидов Fe_2Ti и FeTi твердостью 4,3–4,5 ГПа. Со стороны стали к ней примыкает тонкая прослойка TiC . Со стороны титана – игольчатая $\alpha+\alpha'$ -Ti структура (определенная по характерному раздвоению рентгеновских линий), твердость которой уменьшается с удалением от границы раздела с 3,4 до 3,2 ГПа. В стальном слое образуется твердый раствор титана в α -Fe твердостью 2,2–2,4 ГПа. Далее зафиксирован обезуглероженный слой с зернами, вытянутыми в направлении, перпендикулярном границе соединения.

В центральной части ДЗ наблюдаются периодически повторяющиеся (с шагом 220–240 мкм) клиновидные «стоки диффузии» толщиной 10–20 мкм, ориентированные по нормали к границе соединения (рис. 3), химический состав которых ($\approx 25\%$ Fe и 75% Ti) соответствует интерметаллиду $\text{Ti}_{(2,3)}\text{Fe}$. Между ними находится β -Ti твердый раствор и продукты его распада с химическим составом 20–37 ат. % Fe и 63–80 ат. % Ti.

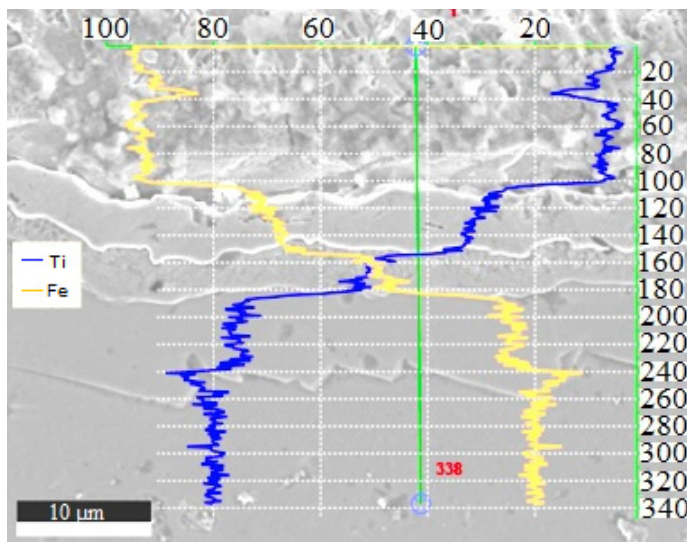


Рис. 2. СЭМ-изображение участка ДЗ с кривыми распределения химических элементов ($\times 650$)

Установлено, что при повышении температуры термообработки образование составляющих ДЗ прослоек происходит последовательно. При температуре 750°C и выдержке в течение 1 ч в местах, где прошла

максимальная деформация, образуется игольчатая прослойка $\alpha + \alpha' - \text{Ti}$, толщина и относительная протяженность которой увеличивается с ростом времени термообработки от 37 (0,5 ч) до 46 мкм (10 ч) и от 0,51 до 0,56 соответственно (рис. 1).

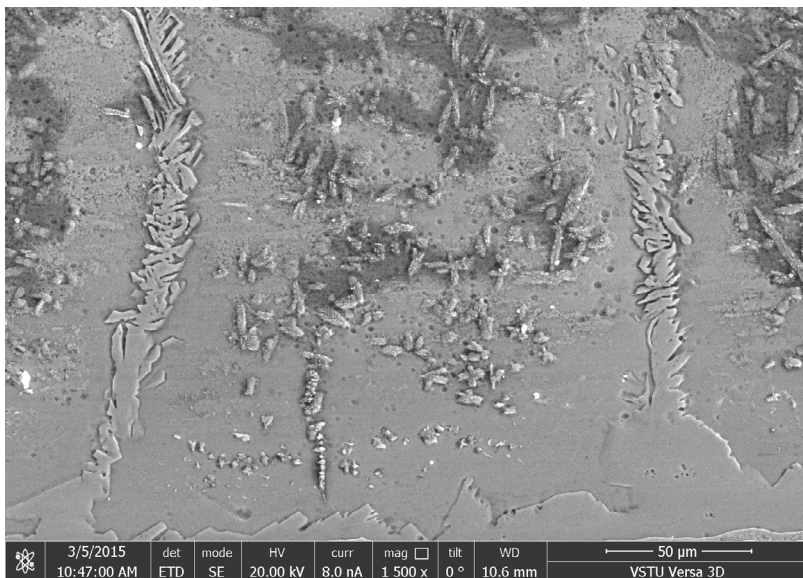


Рис. 3. Центральная часть ДЗ с клиновидными образованиями ($\times 1000$)

Повышение температуры до 850 °С приводит к ее дальнейшему росту. Толщина увеличивается до 150 мкм, а относительная протяженность – до 1. Одновременно происходит снижение твердости с 5,2 до 2,8 ГПа (при 750 °С) и с 3,5 до 2,6 ГПа (при 850 °С).

Вокруг игольчатой прослойки располагается зона твердого раствора железа в титане с параметрами решетки $a = 2,93$ и $c = 4,65$ Å и твердостью ≈ 5 ГПа.

Обезуглероженная зона толщиной 0,73 мм проявляется после термообработки при 750 °С в течение 1 ч. Увеличение времени выдержки до 10 ч приводит к ее росту до 1,19 мм. При 850 °С прослеживается та же тенденция с изменением толщины от 0,75 до 1,73 мм.

При 1000 °С за счет замедления диффузионной подвижности углерода [5] интенсивность роста обезуглероженной зоны уменьшается. Четкая граница игольчатой прослойки при этом не наблюдается и о ее толщине можно судить только по изменению микротвердости.

После получасовой выдержки толщина слоя TiC составляет 3,3 мкм, а после 10 ч – 8 мкм. Толщина карбидо-интерметаллидных прослоек с увеличением времени термообработки растет, при этом их твердость остается неизменной и составляет 4,3–4,7 ГПа, а толщина прослойки интерметаллидного состава увеличивается соответственно с 60 до 230 мкм.

В стали толщина прослойки твердого раствора меняется от впадины к гребню волны. Тем не менее ее средняя толщина при том же времени выдержки увеличивается от 23 до 135 мкм. Одновременно растет и ее твердость с 1,5 до 2,65 ГПа за счет увеличения концентрации титана в твердом растворе.

Выводы

1. Фазовый состав диффузионной зоны в композите титан ВТ1-0 + сталь 20 определяется температурно-временными условиями нагрева. При температурах до 800 °С она состоит из $\alpha + \alpha'$ -Ti, твердого раствора железа в титане и обезуглероженной зоны.

2. При нагреве в интервале температур 900–1000 °С ДЗ состоит из пяти слоев: игольчатая $\alpha + \alpha'$ -Ti структура, прослойка, состоящая из интерметаллидов Fe₂Ti и FeTi, тонкая прослойка TiC, твердый раствор титана в α -Fe и обезуглероженный слой.

1. Трыков Ю. П., Шморгун В. Г. Свойства и работоспособность слоистых композитов. Волгоград, 1999. 190 с.

2. Трыков Ю. П., Гуревич Л. М., Шморгун В. Г. Титаностальные композиты и соединения. Волгоград, 2013. 344 с.

3. Трыков Ю. П., Арисова В. Н., Слаутин О. В., Шморгун В. Г. О взаимодействии компонентов в титано-стальном композите // Перспективные материалы. 2004. № 6. С. 43–47.

4. Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и титановых сплавов. М., 1965. 336 с.

5. Блантер М. Е. Фазовые превращения при термической обработке стали. М., 1962. 268 с.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00418).

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ: ВОДОСНАБЖЕНИЕ И ВОДООТВЕДЕНИЕ

Ю. В. Аникин, В. И. Шилков

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

По результатам исследования определены проблемы инфраструктурных звеньев подсистемы промышленного водоснабжения и водоотведения машиностроительных предприятий. Предложены основные теоретические и практические принципы формирования стратегии безопасного и эффективного водоснабжения и водоотведения. Предложен комплекс организационно-технологических мероприятий на примере гальванического цеха.

The problems of water supply and sewage disposal infrastructure of machine-building industry are identified after analyzing of the results of scientific research. The theoretical and practical strategical principles of the safety and effectiveness of water supply and wastewater treatment are proposed. The complex of organizational and technological measures for galvanizing plant is proposed.

Эффективность функционирования *промышленных предприятий* зависит от эффективности функционирования производственной инфраструктуры и ее отдельных звеньев, обеспечивающих производственный процесс необходимыми ресурсами, например, *газом, электроэнергией, теплотой и водой*. Машиностроение относится к отраслям промышленного производства, занимающим лидирующие позиции по потреблению воды для производственно-технологических целей.

Эта же отрасль является и «производителем» загрязненных сточных вод, которые из-за наличия токсичных веществ, не всегда удаляемых на очистных сооружениях предприятия, создают проблемы для окружающей среды, если сбрасываются после них в природные водоемы, или первоначально для систем городской канализации [1–3].

Значительное количество опасных и вредных веществ содержится в сточных водах, например:

- *литейного цеха*, в котором вода используется при гидравлической выбивке стержней, при транспортировке и промывке формочной земли, при гидроудалении отходов горелой земли, а также при работе систем обеспыливания;

- *цеха механической обработки деталей*, в котором вода применяется для охлаждения инструмента и промывки деталей;
- *окрасочного участка* и некоторых других машиностроительных производств, в которых вода используется для охлаждения, смыва загрязнений;
- *гальванического производства*, для которого требуется самое большое количество воды для приготовления растворов травления и подтравливания, обезжиривания, технологических растворов для нанесения разнообразных покрытий, а также для промывки деталей. Физико-химические показатели качества воды, используемой в гальванических линиях, определяются соответствующими нормативами [4].

Объектом исследования в данной статье являются системы промышленного водоснабжения и водоотведения. Несмотря на то, что в отечественной и зарубежной литературе [5–13] уделено большое внимание отдельным вопросам функционирования систем водоснабжения и водоотведения на промышленных предприятиях, отсутствует комплексный подход к решению задачи повышения эффективности работы этих систем. Например, в работе [14] отмечается, что «на сегодняшний день в Свердловской области накоплено более 350 тыс. т отходов гальванического производства. Однако пока не создана система по их переработке и длительному хранению».

Исследование и анализ состояния и форм организации систем водоснабжения и водоотведения на 23 промышленных предприятиях за период с 1980 г. по настоящее время, в том числе машиностроительных, позволили выявить следующие *основные проблемы систем водоснабжения и водоотведения*:

- физический и моральный износ оборудования, а также недостаточность средств для его замены;
- слабость аналитической базы предприятий, а зачастую ее практическое отсутствие;
- отсутствие приборов учета расходов воды и сточных вод или применение устаревших приборов;
- большие потери воды из-за несовершенства применяемой арматуры (например, задвижки, водоразборная арматура);
- низкая энергоэффективность оборудования (насосное, воздуходувное оборудование);
- применение на станциях водоподготовки и станциях очистки сточных вод технологий, не соответствующих современным требованиям;

- недостаточный уровень квалификации специалистов систем водоснабжения и водоотведения большинства промышленных предприятий в вопросах применения современных технологий водоподготовки и очистки сточных вод.

Именно современные технологии являются одним из действенных рычагов повышения технико-экономического уровня систем водоснабжения и водоотведения. За последние годы в водоподготовке и очистке сточных вод начали широко внедряться перспективные мембранные технологии. Например, в работе отмечается, что «...затраты на 1 м³ воды, обработанной мембранной технологией, по сравнению с традиционными технологиями неуклонно снижаются. Если десять лет назад они были в несколько раз больше, то в настоящее время не только сравнялись, но стали меньше» [15].

Практические аспекты анализа и решения возникающих проблем водоснабжения и водоотведения могут быть проиллюстрированы на примере работы гальванического цеха машиностроительного предприятия. Следует отметить, что, несмотря на существующие физические методы и различные современные технологии нанесения покрытий на поверхности деталей, гальванические технологии продолжают занимать лидирующие позиции и постоянно развиваются. Гальваническое производство по своей сути использует воду для целого ряда операций, и качество воды во многом определяет качество готовой продукции этого производства, так как деталь с плохим покрытием идет в брак. Источники водоснабжения для машиностроительного предприятия могут быть различными в зависимости от целого ряда местных условий. Если предприятие располагается в городской черте, то оно, как правило, забирает воду на все нужды из городского водопровода. До введения в действие ГОСТ 9.314–90 в технологических процессах гальваники использовалась вода питьевого качества и частично «высокоомная» вода, получаемая из воды питьевого качества.

Некоторые крупные предприятия имеют свои системы производственного и противопожарного водоснабжения, забирающие воду из поверхностного или реже подземного источника и имеющие свои сооружения водоподготовки. В этом случае затраты предприятия на производство воды для гальванического производства увеличиваются.

Самое значительное количество воды потребляется на промывку деталей после каждой стадии технологического процесса (подготовка поверхности, нанесение покрытия, отделочные операции). Для уменьшения расхода промывной воды ГОСТ 9.314–90 предусматривает установку ванн улавливания, внедрение многоступенчатой промывки, размещение локальных установок очистки и возврата промывной воды. Все это

очень сильно осложняет ситуацию на предприятиях, существующих достаточно давно и не имеющих необходимых площадей. Тем не менее, существуют решения, которые позволяют изменить ситуацию и в этих условиях. В работе описаны способы нормирования водопотребления и сокращения расхода воды, в том числе без больших капитальных затрат [16]. Показана возможность организации бессточных операций нанесения покрытий на примере конкретной гальванической линии. Представлены основные положения и порядок выбора схем промывок для гальванической линии.

Кроме проблем с качеством исходной воды, у большинства гальванических производств, как правило, очень много проблем со сточными водами, которые выводятся из основного технологического производства. Эти проблемы носят как организационный, так и технологический характер.

Например, цианодержащие стоки представлены промывными водами, утечками и проливами от гальванических растворов кадмия, меди, серебра, золота и цинка. Концентрации цианистых технологических растворов несколько различаются, но в большинстве ванн общая концентрация цианидов составляет около 40 г/л. Такие растворы смешиваются с промывными цианодержащими водами и после обезвреживания цианидов, как правило, путем окисления в щелочной среде, соединяются на очистных сооружениях с другими сточными водами. Далее общий поток нейтрализуется, и металлы остаются в образующемся осадке, который практически не находит применения и наносит серьезный ущерб окружающей среде. Конечно, данной судьбы избегают золото и серебро, которые все же извлекают отдельно осаждением или ионным обменом [17].

Технологические растворы в процессе нанесения покрытий изменяют свой состав под действием ряда факторов: вынос основных компонентов из растворов с деталями, разложение компонентов за счет основных или побочных химических реакций, накопление побочных продуктов, загрязнение от вносимых корректирующих реагентов и за счет коррозии оборудования, поступление загрязнений из воздушной среды.

Обычные варианты решения этой проблемы: использование раствора до момента начала его плохой работы и замена новым свежим раствором или постоянное удаление части раствора в процессе работы и добавление свежего раствора. Отработанные растворы в обоих случаях, как правило, сбрасываются на очистные сооружения и дозируются в разбавленные сточные воды. Иногда на предприятии организуется процесс отдельной обработки таких растворов с целью выделения ценных

компонентов и очень редко для восстановления их и возвращения в технологический процесс.

Кроме этого, могут быть использованы методы постоянной профилактики растворов в процессе работы для поддержания их в работоспособном состоянии: фильтрация (микрофильтрация), реагентное осаждение загрязняющих компонентов или их извлечение из раствора в постоянном режиме методами ионного обмена (сорбции), мембранными методами, электродиализа.

Для повышения эффективности работы гальванического цеха предлагаем осуществление следующих *организационно-технологических мероприятий*:

- внедрение прогрессивных систем промывки изделий;
- рациональные схемы размещения гальванических ванн;
- внедрение локальных установок по обработке промывных вод и отработанных технологических растворов;
- организация систем замкнутого водоснабжения и водоотведения;
- переработка отходов гальванического производства и очистки сточных вод с целью их утилизации;
- непрерывное повышение квалификации специалистов по инновационным технологиям водоснабжения и водоотведения.

Анализ совокупности организационных, экономических и технологических проблем, связанных с водоснабжением и водоотведением, позволил сформулировать ряд *основных теоретических и практических принципов* организации эффективного функционирования данных систем:

- системы водоснабжения и водоотведения машиностроительных предприятий должны рассматриваться в качестве элементов инфраструктурного комплекса предприятия как сложные системы с большим количеством внутренних и внешних взаимосвязей;
- в структуре систем водоснабжения и водоотведения, обеспечивающих работу предприятия, могут быть выделены основные и вспомогательные элементы;
- стратегическое планирование и оценка перспектив развития систем водоснабжения и водоотведения предприятия, должны учитывать действие множества детерминированных и случайных факторов;
- стратегический подход к функционированию систем водоснабжения и водоотведения должен опираться на методы стратегического анализа внешней и внутренней среды (PEST, SWOT, модель 7S);
- эффективность функционирования системы водоснабжения и водоотведения должна основываться на постоянном развитии и внед-

рении инновационных технологий и оборудования, взаимодействии с технологическими службами гальванического производства;

- одной из важных организационных составляющих эффективной системы водоснабжения и водоотведения является подготовка квалифицированных специалистов по водоснабжению и водоотведению;

- неотъемлемой частью системы водоснабжения должны стать современные информационные системы сбора технологической информации для целей отчетности, анализа и принятия управленческих решений;

- экологические требования к качеству сточных вод должны восприниматься промышленными предприятиями не только с позиций потенциальной угрозы штрафных санкций, но и как моральная ответственность за здоровье граждан и состояние окружающей среды.

Таким образом, на основании проведенного исследования можно сформулировать *ряд выводов*:

- эффективность работы машиностроительного предприятия в значительной степени зависит от эффективности и надежности работы систем водоснабжения и водоотведения;
- на предприятиях должен быть проведен комплекс организационных мероприятий для повышения эффективности управления сточными водами и утилизации отходов;
- внедрение современных технологий водоочистки положительно повлияет не только на экономические характеристики работы предприятия, но и будет способствовать улучшению его социального статуса;
- одним из перспективных направлений может стать переход промышленных предприятий на замкнутые системы водообеспечения, что будет способствовать и сокращению нагрузки на водоочистные комплексы и уменьшению снижения потерь питьевой воды;
- вместе с тем решение проблем водоснабжения и водоотведения требует комплексного и динамического подхода к стратегическим ориентирам и целям, стоящим перед машиностроительным предприятием;
- должна быть произведена технологическая и экономическая оценка сточных вод предприятия, т. е. возможность применения той или иной технологии для их очистки с точки зрения возврата в производство (обработка на локальных установках без сброса на очистные сооружения или отведение на очистные сооружения отдельным потоком, либо отведение смешанного потока нескольких видов сточных вод). При этой оценке должны быть также учтены варианты возможной обработки осадков сточных вод.

Результаты анализа типовых и специфических проблем и резервов должны быть использованы не только для разработки организационно-технических мероприятий по водоснабжению и водоотведению на конкретном предприятии, но и могут быть приняты во внимание при разработке инвестиционных программ различного уровня.

1. Виноградов С. С. «Экологически безопасное гальваническое производство» / под редакцией проф. В. Н. Кудрявцева. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., 2002. 352 с.

2. Corcoran E., Nellemann C., Baker E., Bos R., Osborn D., Savelli H. 2010. Sick Water? The central role of waste-water management in sustainable development. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, UN-HABITAT, GRID-Arendal. URL: http://www.unep.org/pdf/SickWater_screen.pdf.

3. Wastewater Management. A UN-Water Analytical Brief. URL: http://www.unwater.org/fileadmin/user_upload/unwater_new/docs/UN-Water_Analytical_Brief_Wastewater_Management.pdf

4. ГОСТ 9.314-90. Единая система защиты от коррозии и старения. Вода для гальванического производства и схемы промывок. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1991. 18 с.

5. Смирнов Д. Н., Генкин В. Е. Очистка сточных вод в процессах обработки металлов. М.: Металлургия, 1989. 251 с.

6. Methodologies for feasibility studies related to wastewater reclamation and reuse projects / A. Urkiagaa, L. De las Fuentes, B. Bisb, E. Chiruc, B. Bodod, F. Hernández, T. Wintgens. Desalination. 2006. 187. P. 263–269.

7. Инновационные технологии очистки // ЮНИДО в России, № 1. URL: <http://www.unido-russia.ru/archive/num1/art14>.

8. Potential of carbon nanotubes in water purification: an approach towards the development of an integrated membrane system / Soumitra Kar, R. C. Bindal, S. Prabhakar, P. K. Tewari, K. Dasgupta, D. Sathiyamoorthy // Int. J. of Nuclear Desalination, 2008. Vol. 3, No 2. P. 143–150. URL: <http://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=20221>.

9. Технология извлечения меди, никеля, цинка из отработанных концентрированных растворов / Ю. Н. Меркушев, В. Г. Маклецов, В. Г. Петров // Гальванотехника и обработка поверхности. 2002. № 3.

10. Электрофлотационное извлечение ионов металлов, находящихся в составе многокомпонентных систем, из сточных вод гальванического производства / В. А. Колесников, Л. А. Крючкова, В. И. Ильин,

А. В. Колесников // Гальванотехника и обработка поверхности. 2002. № 3.

11. Cyanide remediation: current and past technologies / C. A. Young, T. S. Jordan // Department of Metallurgical Engineering, Montana Tech, Butte, MT 59701. Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research. May 23–24. 1995. Kansas State University. Manhattan, Kansas. URL: <http://www.engg.ksu.edu/hsrc/95Proceed/>

12. Novel Nanofiltration Membranes Consisting of a Sulfonated Pentablock Copolymer Rejection Layer for Heavy Metal Removal / Zhiwei Thong, Gang Han, Yue Cui, Jie Gao, Tai-Shung Chung, Sui Yung Chan, and Shawn Wei // Environ. Sci. Technol. 2014. 48 (23). P. 13880–13887. URL: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es5031239>

13. Очистка сточной воды от солей тяжелых металлов на ОАО ТЗ «Октябрь» г. Тамбова / О. А. Москалева, Е. Д. Таныгина, П. Н. Бернацкий // Вестн. ТГУ. 2014. Т. 19. Вып. 2. С. 801–804.

14. Опыт ОАО «УРАЛГИПРОМЕЗ» переработки отходов гальванических производств / Е. А. Степанов, И. С. Фролов, В. В. Орнатов, А. И. Загудаев, Б. Н. Смирнов // сб. материалов XIII Международ. науч.-практ. симпозиума и выставки «Чистая вода России» 17–19 марта 2015 г. г. Екатеринбург. С. 511–516.

15. Тенденции и перспективы применения мембранных технологий в системах водоснабжения и водоотведения // А. А. Белогорский, В. К. Лапшин. Энергосбережение и водоподготовка. 2006. № 3. С. 9–13.

16. Виноградов С. С. Промывные операции в гальваническом производстве / под ред. проф. В. Н. Кудрявцева. М.: Глобус, 2007. 157 с.

17. Cyanide wastes. Advanced Sensor Technologies, Inc. URL: http://www.astisensor.com/Cyanide_Waste_Treatment.pdf.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗДАЧИ ТРУБ

А. И. Безукладников, С. В. Паршин

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Исследуется процесс раздачи на дорнах различной геометрии шестилучевых профильных труб, применяемых для ремонта нефтяных скважин. Оптимальная конфигурация дорна определяется по критерию поврежденности материала труб. Даны рекомендации по форме профилирующего инструмента.

Explores the process of distributing a six-shaped pipes which used for the repair of oil wells, using various shapes of mandrels. The optimal configuration of the mandrel is determined by damage criterion of the pipes material. Recommendations are given on the form of profiling tool.

В современных условиях нефтедобыча – научно обоснованный процесс, использующий результаты гидродинамического моделирования разработки месторождения. При разработке нефтяных месторождений в пласт закачивают воду (для поддержания давления в пласте), в том числе в смеси с попутным нефтяным газом (Водогазовое воздействие) или различными химическими веществами для увеличения нефтеотдачи и борьбы с обводненностью добывающих скважин [1].

Бурение скважин – это процесс сооружения направленной цилиндрической горной выработки в земле, без доступа человека на забой. По мере бурения и введения каждого звена обсадной колонны в скважину на поверхности необходимо устанавливать тяжелые фитинги для присоединения обсадной колонны. Оборудование, предназначенное для этой цели, называется головкой обсадной колонны. Она снабжена клиньями или другими захватами для удерживания веса обсадной колонны.

Бурильная колонна представляет собой спущенную в скважину сборку из бурильных труб, скрепленных между собой бурильными замками, предназначенную для подачи гидравлической и механической энергии к долоту, для создания осевой нагрузки на долото, а также для управления траекторией бурящейся скважины.

При добыче могут возникать различные виды осложнений, например, повреждение бурильных колонн. Для их восстановления в настоящее время используют профильные трубы, которые заводят к месту повреждения скважины, после чего устанавливают трубу, раскатывая или раздавая внутри скважины.

На сегодняшний день существуют несколько способов раздачи профильных труб: раскатка их профилирующими роликами, предварительная раздача труб жидкостью высокого давления и раздача волочением или вдавливанием (при которой профилирование трубы происходит при помощи дорна проходящего внутри трубы).

Раскатка представляет собой процесс, при котором ролики вращаются внутри трубы, постепенно увеличивая ее диаметр, при этом колонна с инструментом перемещается поступательно вдоль скважины.

При раздаче трубы жидкостью высокого давления в нее подается давление порядка 140–160 МПа, что ведет к деформации трубы.

Волочение раздачей обычно применяют для изготовления труб большого диаметра при калибровании внутреннего диаметра трубы, при изготовлении биметаллических труб, а также для исправления брака по внутреннему и наружному диаметру. Раздачу трубы осуществляют:

- протягиванием дорна большого диаметра через неподвижную трубу (раздача вдавливанием);
- протягиванием трубы через неподвижный дорн (раздача волочением).

К настоящему моменту проведена большая работа в исследовании профилирования труб волочением, раскаткой и раздачей. Однако в проведенных работах не рассматривалось достаточно полно влияние геометрии раздающего инструмента на процесс и результат профилирования. В данной работе рассмотрен процесс формоизменения путем раздачи ее подвижным профильным дорном, являющийся, по нашему мнению, перспективным, но в то же время недостаточно исследованным.

Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением основывается на использовании математической теории пластичности.

Напряженно-деформированное состояние металла и энергосиловые параметры могут быть получены из решения при заданных граничных условиях системы уравнений, составленной из дифференциальных уравнений равновесия, соотношений связи компонентов девиаторов напряжений и деформаций, условий пластичности и несжимаемости материала, условий неразрывности деформаций, зависимостей между деформациями и перемещениями.

Одним из методов при математическом моделировании процессов обработки металлов является метод конечных элементов. Сущность этого метода заключается в том, что область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. Эти функции чаще всего выби-

раются в виде степенных полиномов, следовательно, вычисления становятся достаточно простыми. Долгое время широкому распространению МКЭ мешало отсутствие алгоритмов автоматического разбиения области на «почти равносторонние» треугольники (погрешность, в зависимости от вариации метода, обратно пропорциональна синусу или самого острого, или самого тупого угла в разбиении). Впрочем, эту задачу удалось успешно решить (алгоритмы основаны на триангуляции Делоне), что дало возможность создавать полностью автоматические конечно-элементные САПР.

Современное развитие конечно-элементных САПР позволяет использовать метод конечных элементов для решения сложных задач, решение которых ранее не представлялось возможным. Таким образом, с точки зрения поставленных задач настоящего исследования, наиболее эффективным является метод конечных элементов.

Данный метод уже применялся для решения подобных задач, в частности С.В. Паршиным для отыскания рациональной формы профильных труб, а также корейскими учеными для определения рациональной формы оправки при волочении [2].

В процессе раздачи труб металл находится в условиях объемно деформированного состояния, а конечная формы трубы полностью не известна. Современное развитие конечно-элементных САПР позволяет использовать метод конечных элементов для решения сложных задач, решение которых ранее не представлялось возможным.

Общая модель очага деформации включает в себя трубу и профилирующий дорн определенной формы (рис. 1). При процессе моделирования дорн движется внутри трубы, при этом изменяя форму трубы. При протекании процесса раздачи зона контакта неравномерно распределяется по диаметру дорна, в зависимости от положения «луча» трубы. В зависимости от типа используемого дорна (изменение угла α , длины L , формы) будет различаться протяженность зоны контакта дорна и трубы.

В зависимости от типа процесса изменяется общая площадь зоны контакта дорна и трубы. В данном процессе можно выделить несколько характерных зон очага деформации:

- вершина луча трубы (точка наиболее удаленная от центра трубы);
- впадина (точка ближайшая к центру трубы);
- переходный участок.

Все эти зоны будут участвовать в контакте с дорном, но в различной степени.

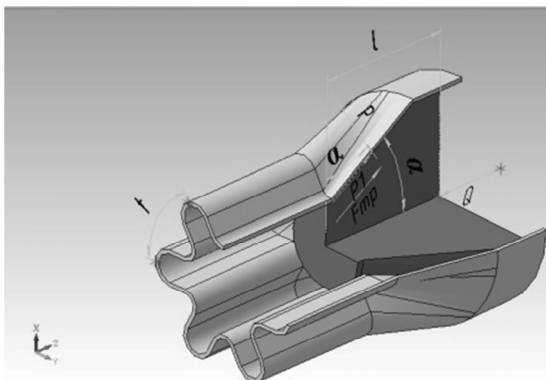


Рис. 1. Схема очага деформации

Данная геометрическая модель весьма сложна для математического описания, в связи с этим необходимо ввести допущения которые бы позволили бы упростить математическую модель процесса. Принятые допущения: упругой деформацией дорна пренебрегаем, вследствие ее незначительности, симметричность трубы позволяет рассматривать лишь половину трубы (рассеченную вдоль оси). Также не рассматривается труба полной длины, а лишь участок, необходимый для получения расчетов необходимой точности.

Изменяемые параметры данной геометрической модели следующие:

- L – длина дорна;
- α – угол подъема дорна;
- форма дорна (на рис. 2 представлен ряд рассматриваемых дорнов для раздачи трубы). Так дорны типа 1.1, 1.2, 1.3 – это простые конусообразные дорны. Дорны типа 2.1, 2.2, 2.3 – с «вогнутой» рабочей поверхностью, а тип 3.1, 3.2, 3.3 – с выпуклой. Рассмотрены дорны различной длины для каждого из типов. Также все дорны имеют калибрующий участок постоянного диаметра, что позволяет избежать уменьшения диаметра профилируемой трубы после обработки с отхождением от стенок скважины.

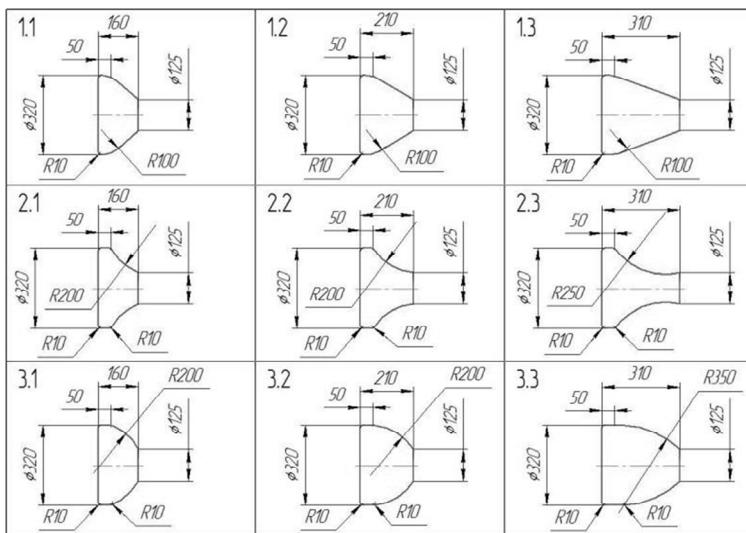


Рис. 2. Геометрические параметры раздающих дорнов

Процесс раздачи трубы симулировался при помощи программного обеспечения DEFORM-3D с использованием конечно-элементной модели представленной на рисунках 2.6 и 2.7. Геометрические размеры трубной заготовки представлены на рисунке 2.8. Для раздачи трубы применялись дорны с различной длиной, углом конуса дорна и формой заходной части. Во всех процессах моделирования труба раздавалась до наружного диаметра 320 мм, задаваемого матрицей имитирующей стенки скважины.

Объемная модель решаемой задачи состоит из трех деталей – модели трубы, модели дорна и модели скважины. Масштаб построения модели – 1:1.

Для уменьшения времени решения рассматриваемая модель трубы была рассечена на два объема по оси симметрии, один из объемов был удален. С целью проверки возможности использования данного упрощения была также построена полная модель трубы, не рассеченная на две части. Полученные после решения результат позволят говорить о возможности данного упрощения, поскольку результирующие напряжения и поврежденность располагались симметрично.

Материал труб рассматривался как упругопластическая среда. Кривая напряженно-деформированного состояния материала была задана с помощью встроенной библиотеки программы DEFORM-3D (рис. 2.4). Для стали 20 она предполагает следующие параметры: Модуль Юнга

$E = 212$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Температура в ходе моделирования принималась постоянной, равной 20°C , как нормальная температура.

Для моделирования использовалась половина трубы, длиной 500 мм состоящая из 45 000 элементов. Длина раздаваемой трубы определяет величину хода инструмента и следовательно время расчета. Также известно, что формоизменение на переднем и заднем концах трубы имеет свои особенности. Для исключения влияния этих особенностей необходимо выбрать такую длину трубы, которая бы позволила реализовать устойчивый процесс формоизменения. Исследование этого вопроса рассматривается в [3], и, исходя из полученных данных установлено, что необходимая длина трубы для получения точных результатов должна составлять как минимум полтора диаметра дорна. Важным является получение максимально точной копии твердотельной модели, при разбивке конечными элементами, при сохранении минимального количества элементов, составляющих модель. Такое требование необходимо для снижения времени решения. При разбитии криволинейной поверхности трубы количество необходимых элементов заметно возрастает. Очевидно, что линейные размеры элемента не должны превышать толщину стенки раздаваемой трубы [4].

Контроль ошибок разбивки осуществляется прежде всего критериями оценки ошибок, заложенными в программу осуществляющую разбивку. Основной контроль ошибок осуществляется поиском значительных искажений формы при разбивке, при условии минимизации числа конечных элементов, использованных в модели. Количество элементов, на которые разбивалась труба, определялось опытным путем, и было установлено, что необходимая точность вычислений достигается при наличии 3–4 элементов по толщине стенки. С целью проверки возможности использования данного условия был так же произведен расчет модели разбитой на значительно большее число элементов (6 по толщине стенки). Полученные после решения результат позволяют говорить о возможности использования для расчетов модели, имеющей 3–4 элемента по толщине стенки, поскольку результирующие напряжения и поврежденность отличались незначительно.

Контактные взаимодействия трубы с дорном учитывали в виде модели Амонтона – Кулона, коэффициент трения принимали согласно [5] равным 0,2.

В качестве критерия для расчета выбора рациональной технологии раздачи в данной работе, по аналогии с работой С.В. Паршина [4] была принята степень поврежденности металла, рассчитываемая (для условий отсутствия макроразрушений) по выражению:

$$\omega = \omega_0 + \frac{\lambda}{\lambda_p} - \Delta\omega,$$

где ω_0 – исходная (до рассматриваемой пластической деформации) поврежденность металла, которую приняли равной нулю как устраненную предшествующей термообработкой;

$\Delta\omega$ – поврежденность, устраняемая термообработкой. Поскольку термообработка в скважине не производится, то в расчетах ее принимаем равной нулю.

В данном случае при равенстве нулю первого и третьего слагаемых речь идет только о соотношении действующей и предельной деформаций, из которых первая – эффективная.

λ – степень деформации, определяемая по формуле:

$$\lambda = \sqrt{3} \cdot \varepsilon,$$

где ε_i – интенсивность деформаций, данная величина может быть получена путем конечно-элементного анализа;

λ_p – степень деформации до разрушения при заданном напряженном состоянии, она может быть определена экспериментально для данной марки материала в зависимости от показателя напряженного состояния $\frac{\sigma}{T}$ и показателя Лоде. В свою очередь экспериментальные зависимости

степени деформации могут быть аппроксимированы как:

$$\lambda_p = [\chi_2 - (\chi_1 - \chi_2)\mu_\sigma] \exp[\lambda_2 - (\lambda_1 - \lambda_2)\mu_\sigma] \frac{\sigma}{T}$$

- где $\chi_1, \chi_2, \lambda_1, \lambda_2$ – коэффициенты, соответствующие опытам при $\mu_\sigma = -1$ и $\mu_\sigma = 0$. Данные по этим коэффициентам приведены в [4]:
 $\chi_1 = 2,85, \chi_2 = 1,682, \lambda_1 = -0,669, \lambda_2 = -0,695$;
- μ_σ – показатель Лоде;
- σ – среднее нормальное напряжение, данная величина может быть получена путем конечно-элементного анализа;
- T – интенсивность касательных напряжений, данная величина может быть получена путем конечно-элементного анализа.

Равенство $\omega = 1$ соответствует деформации, при которой на поверхности появляется трещина, видимая невооруженным глазом. Это может привести к получению труб, не обладающих требуемыми свойствами.

В общем случае при оценке поврежденности ω исходят из условия:

$$\omega^* < \omega < \omega^{**},$$

где: ω^* – значение поврежденности, до которого возникающие в процессе деформации металла микропоры могут быть полностью залечены последующей термической обработкой.

ω^{**} – значение поврежденности, после которого в процессе обработки, даже после проведения термообработки, ресурс пластичности резко падает и сохраняется остаточная поврежденность в виде значительного количества крупных микропор.

При $\omega^* < \omega < \omega^{**}$ часть дефектов, возникающих при пластической деформации, остается в металле; плотность их распределения и размеры невелики, а ресурс пластичности вследствие термообработки восстанавливается не полностью.

При разработке технологии раздачи профильных труб необходимо принять такие условия, которые гарантируют получение качественных труб, также и с учетом статистического характера распределения показателя пластичности материала. Все спрофилированные трубы должны подвергаться восстановительному отжигу, при котором повреждения устраняются, а ресурс пластичности металла восстанавливается.

Некоторые данные по величинам ω^* и ω^{**} даны в работе [6].

Для труб особого вида, а именно, профильных, вообще необходимо накопление статистических данных, позволяющих получить такие трубы с необходимым комплексом служебных характеристик.

В настоящий момент для определения полученных результатов прием диапазон, соответствующий углеродистой стали:

$$0,2 - 0,3 < \omega < 0,6 - 0,7.$$

В табл. 1 показаны максимальные значения поврежденности для трех типов дорнов различной длины. В результате конечно-элементного анализа был выявлен ряд закономерностей:

- Наблюдалось снижение максимального уровня поврежденности трубы при уменьшении заходного угла/увеличении длины дорна.
- Снижения максимального уровня поврежденности трубы при использовании дорнов «выпуклой» формы (типы 3).
- Наиболее неблагоприятными по поврежденности участки находились на внутренних стенках трубы в «вершинах» лучей трубы, которые изначально находились ближе к оси трубы.

Таблица 1

Значения максимального уровня поврежденности

Тип дорна	Значение максимального уровня поврежденности
1.1	0,20
1.2	0,17
1.3	0,16
2.1	0,40
2.2	0,35
2.3	0,16
3.1	0,17
3.2	0,16
3.3	0,15

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов:

1. Уменьшение заходного угла дорна (уменьшение отношение диаметра профилирующей конусной части к ее длине) позволяет уменьшить степень использования запаса пластичности заготовки.

2. Профиль заходной части дорна оказывает заметное влияние на поврежденность материала.

3. Форма дорна оказывает влияние на уровень поврежденности заготовки. Дорн, имеющий плавное увеличение диаметра за один условный шаг процесса (большей длины), позволяет получить изделие с меньшим уровнем поврежденности, т.е. у достаточно длинных дорнов роль продольной профилировки инструмента снижается. Однако для полного исключения влияния формы дорна на уровень поврежденности заготовки требуется применять дорны значительной длины, что нецелесообразно.

1. Википедия – свободная энциклопедия. [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.wikipedia.org>.

2. Sang-Kon Lee, Myeong-Sik Jeong, Byung-Min Kim, Seong-Kon Lee, Seon-Bong Lee Die shape design of tube drawing process using FE analysis and optimization method // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Т. 66, № 1–4, Р. 381–392, 21 June 2012.

3. *Rasty J., Chapman D.* Isothermal and Thermomechanical Finite-Element Analysis of the Tube Drawing Process Using a Fixed Tapered Plug // *J. of Materials Engineering and Performance*. Т. 1, № 4 (Aug). 1992.
4. *Паршин С.* Процессы и машины для изготовления профильных труб. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. Р. 356.
5. *Леванов А. Н., Колмогоров В. Л., Буркин С. П., Картак Б. Р., Аштур Ю. В., Спасский Ю. И.* Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Metallurgy, 1975. С. 352.
6. *Богатов А. А., Смирнов С. В., Колмогоров В. Л.* Изучение особенностей деформируемости металла при многооперационной холодной деформации с промежуточными отжигами // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1979. № 12. С. 43–46.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ЛЕПЕСКОВ ШАРОВЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

И. М. Березин, Д. И. Крючков

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Исследован процесс изготовления лепестков оболочки шаровых резервуаров методом холодной штамповки. На основе компьютерного моделирования процесса последовательной деформации длинномерных листовых заготовок разработаны рекомендации по оптимизации технологии штамповки лепестков на прессовом оборудовании типа "Schleifstein". Получено экспериментальное подтверждение адекватности результатов численного моделирования для шаровых резервуаров объемом 600–6600 м³.

The process of manufacturing by method of cold pressing the petals shell spherical tanks was investigated. Recommendations on optimization of stamping technology petals on press equipment such as "Schleifstein" were developed on the basis of computer modeling process consistent strain of long blanks. Experimental confirmation of the adequacy of numerical simulation for spherical tanks 600-6600 m³ capacity has been received.

Сварные шаровые резервуары используются для хранения сжатых и сжиженных газов. Геометрическая форма шара наилучшим образом воспринимает избыточное внутреннее давление при меньшей толщине стенки и площади поверхности оболочки по сравнению с резервуаром цилиндрической формы того же диаметра. Шаровые резервуары требуют меньшей площади для их размещения, меньше коммуникаций и дополнительного оборудования. При этом надежность, продолжительность эксплуатации, трудоемкость изготовления и монтажа шаровых резервуаров напрямую зависят от качества изготовления элементов оболочки.

Известны различные виды раскроя шаровых оболочек [1]: раскрой по «телам Платона», экваториально-меридиональный, смешанный и др. Одним из наиболее часто используемых при сооружении резервуаров большого диаметра (более 600 м³) является меридиональный вид раскроя (рис. 1). При этом оболочка состоит из длинномерных лепестков двоякой кривизны и двух крышек (купол и днище). При изготовлении элементов оболочки предъявляются довольно жесткие требования по форме лепестков в связи с опасностью возникновения изгибающих мо-

ментов в оболочке и дополнительных напряжений под действием внутреннего давления.



Рис. 1. Меридиональная схема раскроя корпуса шаровых резервуаров

Целью данной работы является попытка совершенствования технологии изготовления шаровых резервуаров объемом 600–6600 м³ в части сокращения трудоемкости штамповки лепестков на гидравлическом прессе «Schleifstein» в условиях производственной площадки ОАО «Уралхиммаш». Необходимость оптимизации технологии штамповки обусловлена большим количеством операций, выполняемых в ручном режиме, что непосредственно влияет на себестоимость изготовления шарового резервуара в целом. Важность исследования связана с необходимостью многократного контроля формы изготавливаемых лепестков в процессе штамповки и проведения трудоемкой точечной доводки.

Существование современных производительных систем конечно-элементного анализа, таких как Abaqus, Ansys, LS-DYNA и др., позволяет считать подходы численного решения инженерных задач эффективным способом оценки жесткости, прочности и долговечности конструкций, а также оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением. Для решения поставленной задачи используется программный комплекс Abaqus – универсальный конечно-элементный пакет, предназначенный для проведения инженерного анализа. Abaqus изначально ориентировался на решение самых сложных и ответственных задач, с учетом всех видов нелинейностей, а также проведения статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма. Такой подход выгодно отличает Abaqus от других программ подобного уровня, что позволяет в рамках единого подхода сочетать преимущества

явной и неявной схем конечно-элементного анализа. В работе используется решатель Abaqus/Standard.

Существует несколько подходов к описанию движения деформируемой сплошной среды [2–4]. Рассмотрим систему уравнений лежащую в основе лагранжевого подхода.

Уравнение сохранения массы:

$$\dot{\rho} + \rho \operatorname{div}(v) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность; v – скорость.

Уравнение сохранения количества движения:

$$\rho \ddot{x} = \rho g + \operatorname{div}(\sigma), \quad (2)$$

где \ddot{x} – ускорение; σ – тензор напряжений Коши; g – ускорение свободного падения.

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho \dot{u} = \sigma : D + \rho r - \nabla \cdot q, \quad (3)$$

где \dot{u} – скорость изменения внутренней энергии; D – тензор скорости деформации; r – интенсивность объемного теплового источника; q – тепловой поток; ∇ – оператор Гамильтона; « \cdot » – скалярное произведение; « $:$ » – двойное скалярное произведение.

При пространственной дискретизации уравнение (2) переходим к решению уравнения

$$\int_V (\rho \ddot{x} - \rho g - \operatorname{div}(\sigma)) \cdot \Phi dv \quad (4)$$

с соответствующими граничными условиями.

Уравнение (4) сводится к решению дифференциального уравнения

$$M \ddot{d} = F_i + F_e, \quad (5)$$

где \ddot{d} – вектор узловых ускорений; M – матрица масс; F_i , F_e – векторы внутренних и внешних сил.

Пространственная дискретизация уравнения (3) предполагает переход к решению уравнения

$$\int_V (\rho \dot{u} - \sigma : D - \rho r + \nabla \cdot q) \cdot \varphi dv, \quad (6)$$

Уравнение (6) сводится к

$$M^\theta \dot{\theta} = F_i^\theta + F_e^\theta, \quad (7)$$

где θ – температура; M^θ – матрица теплоемкостей; F_i^θ , F_e^θ – векторы внутренних и внешних тепловых нагрузок.

Вектор внутренних сил входящий в уравнение (5), определяется третьим членом подынтегрального выражения (4)

$$\int_V \operatorname{div}(\sigma) \cdot \Phi dv = \int_B (\sigma n) \cdot \Phi db - \int_V \sigma : (\nabla \Phi) dv, \quad (8)$$

и он равен

$$F_i = \int_V \sigma : (\nabla \Phi) dv \quad (9)$$

Вектор F_i – получается в результате суммирования внутренних сил для всех элементов, входящих в рассматриваемую систему. Для одного элемента вектор внутренних сил определяется следующим выражением:

$$f_i^e = \int_{V^e} B^T \bar{\sigma} dv, \quad (10)$$

где B – производная от функции формы элемента; $\bar{\sigma}$ – вектор, составленный из шести компонентов тензора напряжений.

Значения ускорений, скоростей и перемещений:

$$\begin{aligned} \ddot{d}_n &= M^{-1}(F_i + F_e), \\ \dot{d}_{n+\frac{1}{2}} &= \dot{d}_{n-\frac{1}{2}} + \ddot{d}_n \Delta t, \\ d_{n+1} &= d_n + \dot{d}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t, \end{aligned} \quad (11)$$

где индексы относят искомые величины к соответствующим временным слоям.

Скорость деформации определяется выражением

$$\Delta \varepsilon = D \Delta t, \quad (12)$$

где $-D$ – тензор скорости деформации, компоненты которого определяются как

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{dv_i}{dx_j} + \frac{dv_j}{dx_i} \right). \quad (13)$$

Для учета вращения среды как абсолютно жесткого тела при вычислении тензора напряжений Коши используется коротационная производная Яуманна:

$$\dot{\sigma} = L : D + \sigma W - W \sigma, \quad (14)$$

где W – тензор-спин, компоненты которого равны

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{dv_i}{dx_j} - \frac{dv_j}{dx_i} \right). \quad (15)$$

Компьютерное моделирование основывается на существующем технологическом процессе последовательной холодной штамповки длинномерных листовых заготовок (лепестков) шарового резервуара на гидравлическом рамном прессе «Schleifstein» с усилием 16 МН. В качестве исходной информации о геометрии инструмента и заготовки использовалась заводская конструкторская документация.

При построении компьютерной модели процесса штамповки принята схема, изображенная на рис. 2. Последовательное деформирование заготовки происходит в точках в соответствии с их порядковым номером.

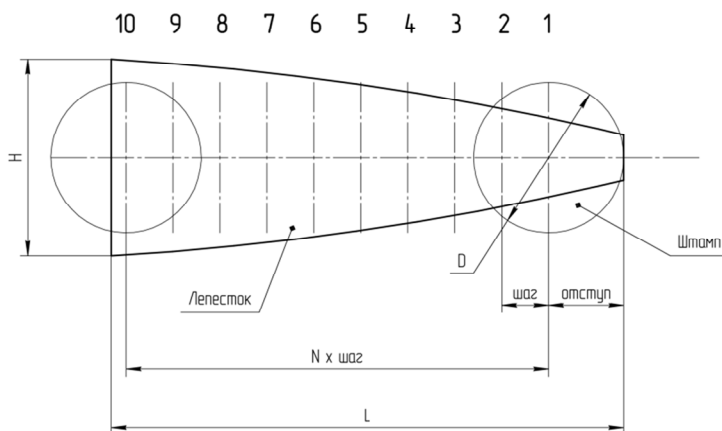


Рис. 2. Схема процесса штамповки

Для упрощения процедуры численного решения компьютерной модели, приняты следующие допущения:

а) заготовка жестко закреплена за один из торцов в наиболее широкой ее части, при этом длина заготовки увеличена на 2 метра для исключения влияния жесткой заделки на конечную форму штампуемой заготовки;

б) деформирующий инструмент (матрица и пуансон) заданы массивом вдоль оси симметрии листовой заготовки. Массив штампов расположенный во втором ряду относительно оси симметрии заготовки повернут на некоторый угол в поперечном направлении по сфере радиусом 8 метров. Штамповый инструмент обладает абсолютно жесткими свойствами;

в) после деформации контактное взаимодействие между прессовым инструментом и заготовкой принудительно отключается.

Контактное взаимодействие между заготовкой и прессовым инструментом описывалось законом трения Амантона – Кулона, коэффициент трения $\mu = 0,2$.

В качестве материала заготовки используется низколегированная сталь марки 09Г2С по ГОСТ 5520-79. Сталь 09Г2С имеет предел текучести 330 МПа, временное сопротивление 480 МПа, относительное удлинение 21 %, ударную вязкость при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ не менее $0,35\text{ МДж/м}^2$. Для идентификации упругопластической модели проведены механические испытания на осевое растяжение стандартных цилиндрических образцов по ГОСТ 1497-84. Модуль Юнга $E = 205,2\text{ ГПа}$. Коэффициент Пуассона $\nu = 0,275$. Толщина заготовки – 24 мм. Тип конечных элементов – C3D8R.

Для автоматизации процесса ввода исходной информации и сокращения времени предпроцессорной обработки разработан и интегрирован в систему Abaqus/CAE интерфейс пользователя представленный на рис. 3. Программный модуль позволяет выполнять построение геометрии инструмента и заготовки, а также выбирать модель материала деформируемого лепестка.

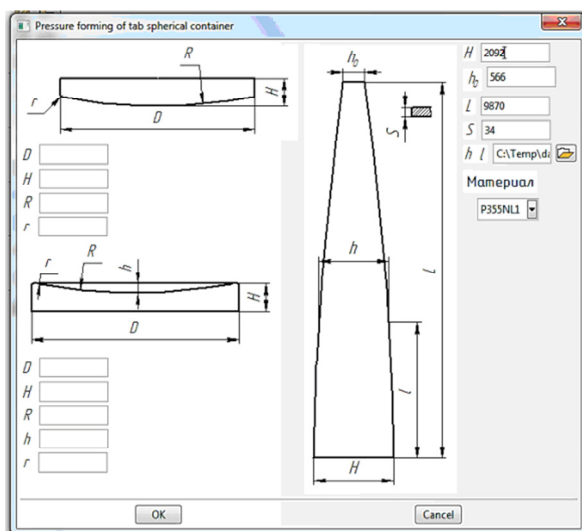


Рис. 3. Интерфейс пользователя в системе Abaqus/CAE

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 4–6.

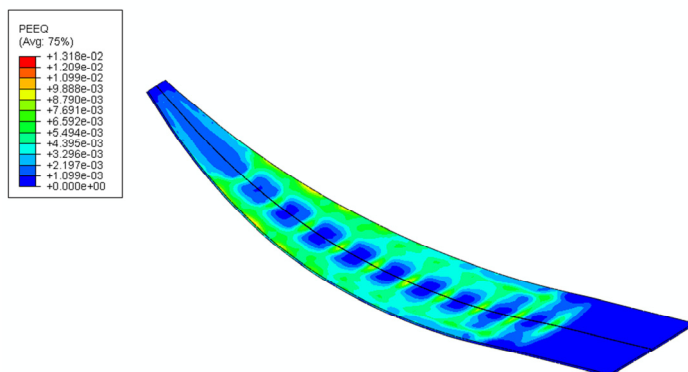


Рис. 4. Распределение эквивалентной пластической деформации в листовой заготовке после штамповки

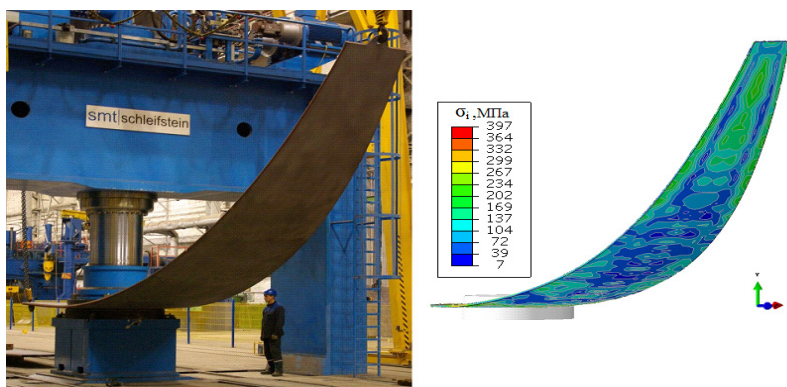


Рис. 5. Заготовка шарового резервуара в процессе деформирования

На рис. 4 показано распределение эквивалентной пластической деформации. Видно, что в листовой заготовке присутствуют непроштампованные участки в центральной и передней (более узкой) части листа. В результате использования такой схемы при холодной пластической деформации механические свойства металла (твёрдость, прочность, пластичность, ударная вязкость и др.) в различных областях заготовки

могут существенно отличаться (рис. 5). На основе полученного распределения эпюр пластической деформации внесены рекомендации по изменению маршрута приложения нагрузок с точки зрения выравнивания пластических зон в разных частях листовой заготовки. В частности, уменьшен шаг штамповки и изменен отступ первой точки приложения нагрузки от переднего края листа.

На рис. 6 приведены расчетные значения усилия деформирования листа различной толщины для радиуса кривизны лепестка 8000 мм. Усилие штамповки приведено в процентах от номинального усилия прессы. Видно, что усилие деформирования существенно изменяется в зависимости от места приложения нагрузки.

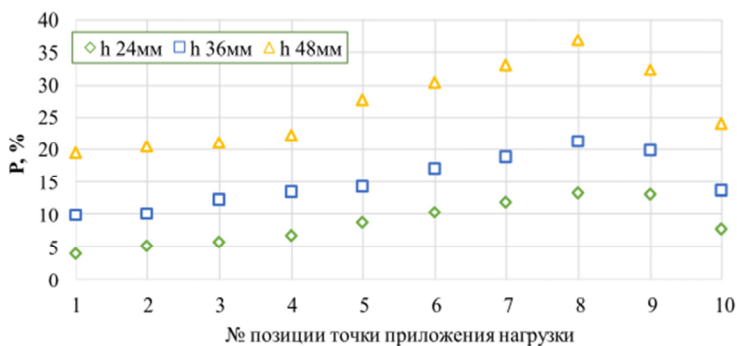


Рис. 6. Усилие штамповки в зависимости от места приложения нагрузки для различной толщины листовой заготовки

Для измерения формы листовой заготовки, полученной в процессе виртуальной штамповки, использовалась CAD-система SolidWorks. При помощи дополнительного построения плоскостей в различных сечениях лепестка и наложения эскизов окружностей радиусом 8000 мм были измерены отклонения формы заготовки от идеализированной сферы.

Выводы

1. Компьютерное моделирование процесса штамповки крупногабаритных корпусных изделий шаровых резервуаров позволило определить усилия необходимые для деформирования заготовки заданного радиуса кривизны при различных схемах приложения нагрузок и варьировании основных геометрических параметров рабочих поверхностей деформирующего инструмента.

2. На основе полученных результатов даны рекомендации по внесению изменений в технологию штамповки лепестков шаровых резервуаров объемом 600–6600 м³ в условиях производства ОАО «Уралхиммаш». Трудоемкость штамповки снижена не менее чем на 15 %, по сравнению с существующей на предприятии технологией за счет возможности получения необходимой формы листовых заготовок при меньшем количестве точек приложения нагрузки и сокращении времени на позиционирование и перекантовку листа.

1. Дикун В. Н., Шейнблит Я. А. Сооружение шаровых резервуаров. М.: Недра, 1987. 192 с.

2. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1978. 287 с.

3. Лурье А. И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.

4. Поздеев А. А., Трусов П. В., Няшин Ю. И. Большие упруго-пластические деформации. М.: Наука, 1986. 232 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЗЛОВ ТРУБЧАТОГО СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА

А. А. Беспальков

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В данной статье рассмотрены и представлены пути решения ряда проблем действующего трубчатого скребкового конвейера. В частности: проблема заклинивания цепи в звездочке поворотной станции; проблема изгиба и скола чугунных дисков на стыке фланцевых соединений; проблема попадания транспортируемого сырья в натяжное устройство при реверсе конвейера.

This article surveys contemporary approaches in solving problems of tubular scraper conveyor. Here are revised: the problem of jamming in the chain sprocket turning station; the problem of flexure and chipping of cast iron wheels on joints flanges; the problem getting raw materials transported in tensioner when reversing the conveyor.

Объектом исследования является трубчатый скребковый конвейер (рис. 1), установленный на участке спекания в цехе по производству глинозема, транспортирующий спек (Al_2O_3) из дробилки в приемный накопительный бункер. Данный конвейер установлен на Богословском алюминиевом заводе (г. Краснотурьинск).

Технические характеристики конвейера:

- производительность: 15 м³/ч;
- длина конвейера по трассе: 15,68 м;
- скорость движения цепи: 0,2 м/с;
- мощность электродвигателя: 5,5 кВт;
- сила натяжения цепи натяжным устройством: 3000 Н;
- цепь тяговая круглозвенная с шагом 100 мм, с установленными на нее скребками шагом 200 мм;
- делительный диаметр приводной, натяжной и отклоняющей звездочек: 424 мм.

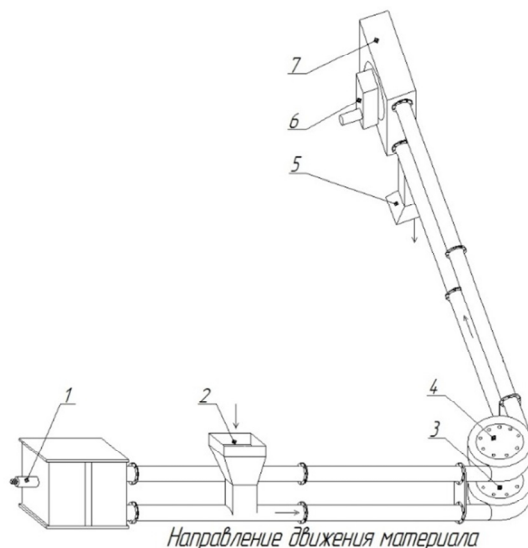


Рис. 1. Общий вид конвейера:

- 1 – натяжное устройство; 2 – приемный бункер; 3 – поворотная станция 1; 4 – поворотная станция 2; 5 – разгрузочный бункер; 6 – мотор-редуктор; 7 – приводная станция

В процессе эксплуатации конвейера возникает ряд проблем, которые увеличивают время простоя, а также требуют ремонта и чистки конвейера от 3 до 8 ч в неделю.

Одной из основных проблем данного конвейера является проблема заклинивания цепи в звездочке поворотной станции (рис. 2).



Рис. 2. Поворотная станция

При прохождении грузовой ветви через поворотную станцию 1 (рис. 1) материал сыпается в нее и попадает между зубом звездочки и цепью, и тем самым происходит заклинивание тягового органа при набегании цепи на звездочку, так как время от времени спек попадает в отверстие звена цепи и прочно застревает в нем. Такое звено не в состоянии надеться на зуб, и это приводит к рывкам всего тягового органа, в результате чего увеличивается нагрузка на привод и срабатывает датчик перегрузки, который останавливает конвейер.

Вторым негативным аспектом является засыпание материала в подшипниковый узел звездочки, что приводит к преждевременному выходу подшипников из строя.

Одним из вариантов решения этих проблем является установка криволинейного участка трубы вместо поворотной станции, но при этом будет происходить повышенный износ трубы и скребков, особенно при транспортировании абразивных грузов [1].

Для решения данной проблемы предлагается на грузовой ветви произвести замену звездочки (рис. 3) в поворотной станции на поворотный обод (рис. 4). Данная замена обеспечит устранение всех вышеуказанных проблем [2].

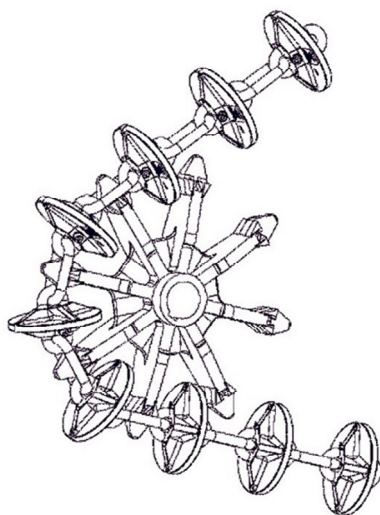


Рис. 3. Звездочка

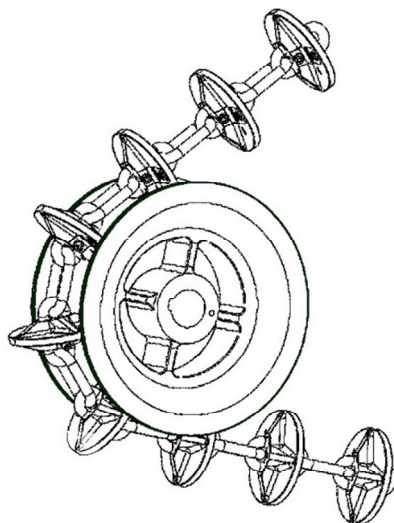


Рис. 4. Поворотный обод

Следующей проблемой, негативно влияющей на работу конвейера, является проблема изгиба и скола чугунных дисков на стыке фланцевых соединений.

Так как между фланцами труб используются уплотнения, а также затруднительно обеспечить довольно точную установку фланцев друг относительно друга, то при переходе диска через фланцевое соединение первый задевает за кромку фланца. В некоторых случаях это приводит к деформации диска и даже его сколу, что отрицательно сказывается на работоспособности конвейера, а также качестве материала, так как в него попадают чугунные осколки. Значение смещения b может достигать 2–4 мм (рис. 5).

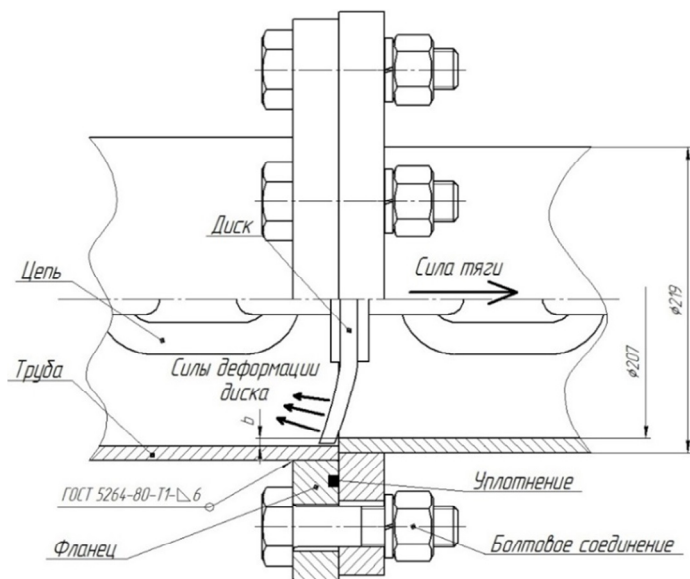


Рис. 5. Фланцевое соединение труб

Чтобы решить вышеуказанную проблему необходимо при производстве транспортирующих труб, перед свариванием фланцев с трубой произвести развальцовку трубы с обоих концов, либо снять фаски с внутреннего диаметра (рис. 6), что обеспечит беспрепятственное прохождение диском фланцевого соединения, а также несколько снизит шум работы конвейера.

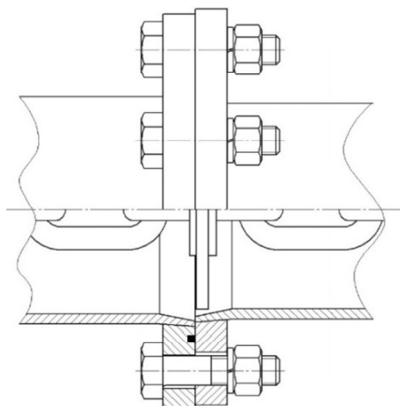


Рис. 6. Развальцованные трубы

Кроме того, на прямолинейных коротких участках холостой (не грузе-
ной) ветви можно обойтись и без направляющих труб. Данное реше-
ние даст нам ряд преимуществ:

- во-первых, на данных участках конвейера контакт между скребка-
ми и трубой будет отсутствовать, так как отсутствует сама труба, это
снизит общие потери на трение, что позволит снизить нагрузку на при-
вод;
- во-вторых, стоимость изготовления этих участков будет суще-
ственно ниже за счет экономии на отсутствующих трубах;
- в-третьих, будет максимально удобен визуальный осмотр тягового
органа.

Предложенная конструкция конвейера требует дополнительно уста-
новки входных раструбов для беспрепятственного вхождения тягового
органа в трубу, а также ограждений цепи для безопасности персонала
(рис. 7).

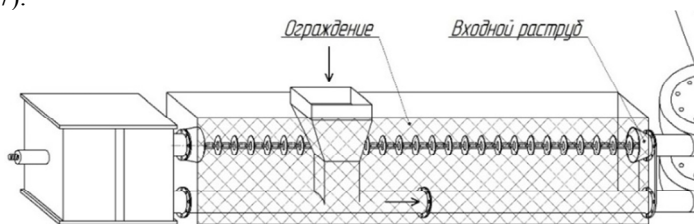


Рис. 7. Конструкция скребкового конвейера
без направляющих труб холостой ветви

Рассчитаем возможное провисание цепи на прямолинейном участке конвейера без направляющих труб. Для этого воспользуемся формулой расчета провисания тягового органа [1]:

$$f = \frac{q \cdot g \cdot l^2}{8 \cdot S},$$

где q – погонная масса тягового органа; g – ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; l – длина участка без направляющих труб; S – сила натяжения цепи.

Для данного конвейера вышеописанные параметры имеют следующие значения: $q = 25,5 \text{ кг/м}$; $l = 3,5 \text{ м}$; $S = 3000 \text{ Н}$.

Следовательно, провисание цепи на участке конвейера длиной 3,5 метра без направляющих труб будет равно:

$$f = \frac{25,5 \cdot 9,81 \cdot 3,5^2}{8 \cdot 3000} = 0,127 \text{ м}.$$

Так как цепь провисает на 127 мм, радиус диска равен 100 мм, диаметр трубы – 219 мм, а делительный диаметр отклоняющей звездочки равен 424 мм, то по несложным расчетам можно определить, на каком расстоянии от трубы будут проходить диски при таком провисании (рис. 8): $424 - 127 - 100 - 219/2 = 87,5 \text{ мм}$, что является приемлемым даже с учетом выступающих фланцев.

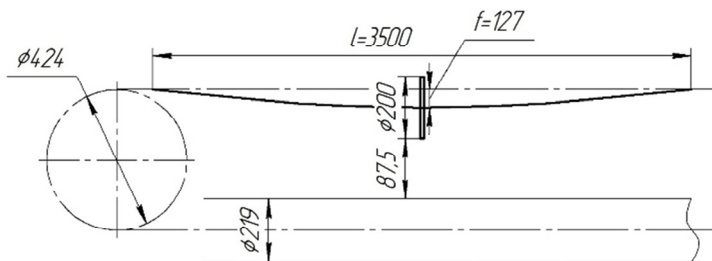


Рис. 8. Провисание цепи на участке без направляющих труб

Еще одной проблемой, возникающей при эксплуатации данного типа конвейеров, является проблема попадания транспортируемого сырья в натяжное устройство при реверсе конвейера.

Бывают случаи, когда необходимо совершить реверс тягового органа, например, при заклинивании механизма или при выполнении ремонта. Иногда реверс может быть и непреднамеренным, например, если при монтаже электрооборудования случайно перепутать местами фазы в цепи, то электродвигатель начнет вращаться в противоположном от желаемого направлении.

Самым экономичным и технологически простым решением этой проблемы станет изготовление разгрузочного окна перед натяжной станцией (рис. 9). Разгрузочное окно не позволит транспортируемому сырью попасть в натяжное устройство при реверсе конвейера, так как весь материал будет сыпаться через это окно в специально расположенный под ним контейнер.

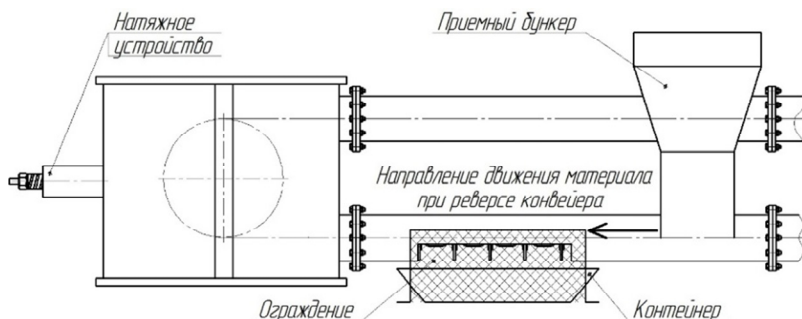


Рис. 9. Разгрузочное окно

В ходе эксплуатации данного конвейера выяснилось, что за рабочую неделю на ремонт, чистку и замену его деталей уходит от трех до восьми часов. Для устранения неисправностей необходима бригада из трех человек, стоимость одного человеко-часа составляет примерно 500 рублей. Следовательно, прямые затраты равны от 18000 до 48000 рублей в месяц. Внедрение предложенных решений позволит снизить вышеуказанные затраты, сократить простой оборудования в ремонте, и увеличит межремонтный период.

1. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины: учеб. пособие для машиностроит. вузов. 3-е изд-е, перераб. М.: Машиностроение, 1983. 487 с.

2. URL: <http://www.schrage.de>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНОЙ ДУГИ КАК ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

М. Ю. Бородин, Е. М. Бородин, М. Г. Близник

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В работе обозначены актуальные направления разработки систем управления в сварочном производстве. Выполнен обзор математических моделей дуги. Создана система автоматического регулирования напряжением дуги при сварке неплавящимся электродом. Предложена концептуальная модель регулирования с учетом степенной вольт-амперной характеристики дуги в динамике. Модельные эксперименты показали качественное соответствие известным из литературы представлениям и реальному поведению дуги в процессе регулирования.

The purpose of article is to show the topical areas of control systems development in welding industry. Different mathematical models of welding arc are reviewed. Arc voltage control system is developed for the welding with non-melting electrode. The conceptual model of control is proposed, where power-law volt-ampere characteristic of arc in dynamics is taken in account. Numerical simulations has shown qualitative correspondence between theoretical concepts and experimental data of other authors.

Введение

На современном этапе активного развития научно-технического прогресса, создания новых материалов и технологий, все большее внимание уделяется интеллектуальным системам управления, позволяющим качественно изменить технологические процессы большинства отраслей промышленного производства. В машиностроительном производстве для самой разнообразной номенклатуры изделий широко используются сварочные процессы и родственные им технологии: резка, наплавка, напыление, плавка и переплавка металлов и т. д. Качественные показатели сварных соединений и наплавленных поверхностей во многом определяются как техническими возможностями оборудования, его механической части, так и гибкостью, «точностью» реализуемого технологического процесса – способностью в течение цикла поддерживать неизменными, периодически изменяющимися или изменяющимися по заданным закономерностям мгновенных значений физических и технологических параметров. Традиционные стационарные процессы сварки и наплавки во многом исчерпали свои технологические возможности.

Уровень возмущений, вносимый в технологический процесс протекающими физическими явлениями и работой элементов оборудования, остается значительным. Таким образом, процессы дуговой сварки представляют собой объекты управления совокупностью свойств сварных соединений. Интеллектуальное управление позволяет стабилизировать ряд технологических параметров, обеспечить оптимальное тепловложение в сварной шов, тем самым получать необходимую геометрию сварного соединения и требуемый для получения заданных свойств металла шва и околошовной зоны, термический цикл.

Обзор математических моделей дуги и разработка системы автоматического управления

Сварочная или плазменная дуга является нагрузкой с ярко выраженным нестационарным характером и характеризуется быстрыми изменениями. Дуга функционирует в условиях воздействия на систему многих неконтролируемых случайных возмущений, что требует в задачах управления достаточно сложных адаптивных алгоритмов. Для создания нового технологического оборудования и в первую очередь эффективных источников напряжения (тока), имеющих высокие динамические характеристики, необходимо моделирование и исследование динамических свойств систем при работе с нелинейной нагрузкой – электрической дугой.

В связи с вышесказанным представляется существенным выбор модели, описывающей процессы в сварочной дуге и построение функциональной модели системы управления параметрами процесса.

На сегодняшний день разработано достаточно много моделей столба дуги, описывающих дугу с различных позиций и с разной степенью детальности. К ним относятся канальная модель столба дуги с равномерным распределением тока по сечению и уравнением, дающим представление о физических параметрах, определяющих напряженность поля в столбе [1]; - цилиндрическая модель столба дуги, учитывающая распределение температуры и плотности тока в столбе дуги, определяющая напряженность электрического поля и сосредоточенность поля в функции тока дуги [1]; двухтемпературная модель столба сварочной дуги, учитывающая термическую и ионизационную неравновесность плазмы [2]; вихревая электродинамическая модель, наиболее полно учитывающая процессы как в столбе дуги, так и в приэлектродных областях, а также в сварочной ванне [2]; термическая модель, устанавливающая зависимость характеристик источника тока с состоянием столба сварочной дуги [2, 3]. Используются также динамические модели дуги, представляющие ее как нелинейный элемент цепи: Касси, Майра, Заруди,

Шельгазе, математическая модель динамической дуги (ММДД), разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона, и другие [3, 4].

Для решения задач в электротехнических терминах, что особенно актуально для разработки систем управления, особого внимания заслуживает ММДД, которая описывает поведение дуги в динамике на основе энергетических параметров и отражает основную особенность дуги – тепловую инерционность. Описание динамических свойств дуги в модели основано статической вольт-амперной характеристики (СВАХ), определяемых либо экспериментально, либо теоретическим путем. ММДД является формальной моделью дуги и не отражает физические процессы, происходящие в ней при сварке. Сварочная дуга при использовании ММДД может быть представлена как нелинейный элемент электрической цепи. Модель можно применять для любых видов статических вольт-амперных характеристик и распространить на случаи дуг с изменяющейся длиной, движущихся дуг и дуг с продувкой газа. Как показано в литературе в частном случае, когда СВАХ имеет степенной вид с показателем степени n , некоторые модели могут быть получены из ММДД, например, модель Касси при $n = 0$, модель Майра при $n = -1$, а модель Заруди реализуется при $n = -(1 - k) / (1 + k)$. Здесь k – показатель нелинейности плазмы [4, 5].

Моделирование

Сварка неплавящимся электродом является одним из основных технологических процессов при изготовлении конструкций ответственного назначения из цветных металлов и сплавов, высоколегированных сталей трудносвариваемых сплавов, а также наплавки материалов с особыми свойствами. Для сварки неплавящимся электродом целесообразно применять системы управления с повышенными требованиями к точности стабилизации напряжения дуги. Таким образом, была рассмотрена типовая система автоматического регулирования напряжения дуги по ее длине при сварке неплавящимся электродом. Для улучшения регулирующих свойств системы возможно использование регуляторов по двум параметрам длине дуги и току с воздействием на положение горелки и источник питания соответственно.

На рис. 1 представлена функциональная схема установки для сварки неплавящимся электродом, которая в общем случае имеет в своем составе источник сварочного тока UZ_3 с регулятором RA_3 , поддерживающий закон изменения сварочного тока; привод перемещения горелки с источником питания UZ_2 , регулятором RA_2 и двигателем M_2 ; а также привод перемещения каретки с источником питания UZ_1 , регулятором RA_1 и двигателем M_1 . В систему включен датчик напряжения DU , обеспечивающий обратную связь по напряжению дуги и датчик тока DA_3 .

Предусмотрены датчики BR_2 и BR_1 , позволяющие обеспечить стабилизацию перемещения горелки и каретки.

Синтез системы управления RMC, позволяющий компенсировать возмущения по напряжению и току дуги, основан на информации о ее длине из основного источника информации – напряжения на дуге. Формирование сварного соединения рассматривают как результат функционирования системы «источник питания – источник нагрева – сварочная ванна».

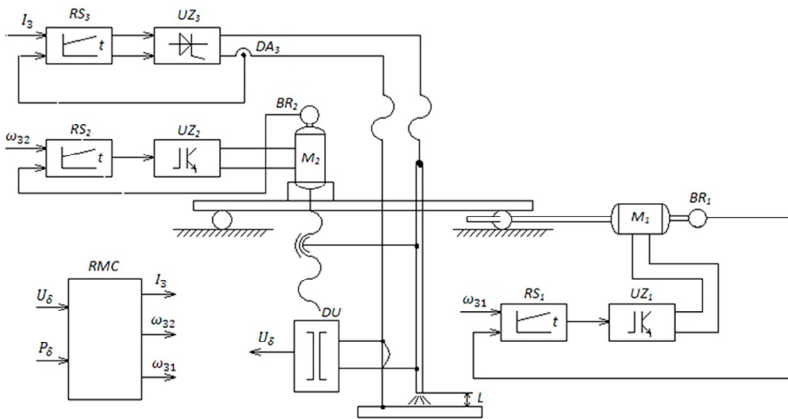


Рис. 1. Функциональная схема установки сварки неплавящимся электродом

Таким образом, систему автоматического управления можно описать следующей линейной системой дифференциальных уравнений выраженной в приращениях.

Известно, что в контуре с неплавящимся электродом напряжение дуги связано с ее длиной функциональной зависимостью:

$$U_d = A + BL_d + \frac{C + L_d}{I_{св}},$$

где U_d – напряжение на дуге, L_d – длина дуги, $I_{св}$ – сварочный ток, A , B и C – коэффициенты, учитывающие геометрические и физические свойства дуги.

Дуга может быть описана следующими уравнениями:

$$U_d = U_{dd} + U_{dt} + \tilde{U}_d$$

$$U_d = k_d l_d$$

$$T_d \frac{dU_{dt}}{dt} + U_{dt} = k_{dt} i_d$$

$$l_d = l_{dv} + l_{dg} + \tilde{l}_d,$$

где U_{dd} и U_{dt} составляющие напряжения на дуге, зависящие от длины и тока дуги соответственно, k_d k_{dt} и T_d – передаточные коэффициенты и постоянные времени соответственно, l_{dv} l_{dg} – составляющие длины дуги, зависящие от скорости привода и глубины провара соответственно.

Сварочный источник питания:

$$i_d = i_{ps} + i_{ts} + \tilde{i}_d$$

$$T_{ps} \frac{di_{ps}}{dt} + i_{ps} = k_{ps} U_d$$

$$T_{ps} \frac{di_{ts}}{dt} + i_{ts} = k_{ts} \tilde{U}_s,$$

где i_{ps} i_{ts} – составляющие тока дуги, зависящие от ВАХ-источника при отклонении напряжения дуги и входного напряжения сети соответственно, k_{ps} k_{ts} T_{ps} – передаточные коэффициенты и постоянные времени соответственно.

Сварной шов:

$$T_i \frac{dh_{gn}}{dt} + h_{gn} = k_{gn} U_d$$

$$T_i \frac{dh_{gss}}{dt} + h_{gss} = k_{gss} \tilde{V}_{ss}$$

$$T_i \frac{dh_{gt}}{dt} + h_{gt} = k_{gt} i_d$$

$$h_g = h_{gn} + h_{gss} + h_{gt},$$

где k_{gn} k_{gss} k_{gt} и T_i – передаточные коэффициенты и постоянные времени соответственно, h_{gn} , h_{gss} , и h_{gt} – составляющие глубины проплавления.

Автоматическое регулирование напряжения:

$$U(t) = U_{dn} - U_d$$

$$T_u \frac{dU_d}{dt} + U_{dt} = k_u U(t)$$

$$T_{sm} \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_{sm} U_y$$

$$T_i \frac{dl_{dv}}{dt} = k_{sm} \omega,$$

где k_u , k_{sm} , T_u , T_{sm} , и T_i – передаточные коэффициенты и постоянные времени соответственно.

В вышеприведенной системе уравнений \tilde{U}_d , \tilde{I}_d , \tilde{I}_d' , \tilde{U}_s и \tilde{V}_{ss} возмущения по напряжению, току, длине дуги, напряжению внешней питающей сети и скорости сварки соответственно.

В модели предполагается, что каретка движется с заданной стабилизированной скоростью. Управление скоростью в процессе сварки не требуется, а модель только обрабатывает возмущения, возникающие в процессе перемещения сварочного агрегата регулированием напряжения дуги.

Модель выполнена в предположении линейности вольт-амперной характеристики в окрестностях рабочей точки для соответствующего режима технологического процесса на основании обобщенной математической модели динамической дуги:

$$\Theta \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = i^2,$$

где Θ – постоянная времени столба дуги, i_θ – ток состояния дуги, т. е. ток соответствующий установившемуся динамическому состоянию на ВАХ-дуги, характеризующемуся током i . Постоянная времени с увеличением тока дуги и скорости обдува уменьшается и для дуг в плазмотронах она находится в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-7}$ с [6]. Напряжение на дуге определяется следующей зависимостью:

$$U_d = \frac{U_{cm.d.}(i_\Theta)}{i_\Theta} i + U_{a-\kappa},$$

где $U_{a-\kappa}$ – сумма приэлектродных падений напряжения, которую в первом приближении можно считать величиной постоянной или/и для длинных дуг ею пренебречь; $U_{ст.д.}(i_\theta) i / i_\theta$ – напряжение на столбе дуги в динамике.

Нелинейная статическая вольт-амперная характеристика $i_\theta(u)$ может быть аппроксимирована следующим степенным выражением:

$$i_{\Theta}(u) = I_0 \left(\frac{u}{U_0} \right)^{1/n},$$

где I_0 и U_0 ток и напряжение в фиксированной точке вольт-амперной характеристики.

Откуда напряжение на дуге может быть выражено зависимостью:

$$U = \left(\frac{i_{\Theta}}{I_0} \right)^n U_0.$$

Учет нелинейности статической вольт-амперной характеристики выполняется из предположения о том, что коэффициент k_{dt} имеет смысл дифференциального сопротивления дуги:

$$k_{dt} = \frac{U_{d.ycm}}{I_{d.ycm}}.$$

Что позволяет k_{dt} связать с аппроксимированной степенной функцией ВАХ следующим отношением:

$$k_{dt} = \frac{dU(i_{\Theta})}{di_{\Theta}} = n \left(\frac{i_{\Theta}}{I_0} \right)^{n-1} U_0.$$

Из уравнения очевидно, что k_{dt} в модели существенно зависит от координат расчетной точки на статической ВАХ I_0 и U_0 .

Учитывая реальный характер ВАХ, можно утверждать, что k_{dt} может изменяться в широких пределах вплоть до изменения знака. Это согласуется с результатами известных методик практических расчетов коэффициентов передачи и постоянных времени. Очевидно, что величина коэффициента k_{dt} в значительной степени зависит от формы кривой вольт-амперной характеристики т. е. степени n аппроксимирующего уравнения.

Изменение коэффициента k_{dt} в разных рабочих точках оказывает существенное влияние на характер и длительность переходных процессов, что согласуется с результатами моделирования на полученной модели. При практическом использовании для реальных технологических процессов можно достаточно точно определять коэффициент k_{dt} для характерных рабочих точек вольт-амперных характеристик, полученных на основании аппроксимации экспериментальных данных.

Известно, что процесс сварки подвержен действию достаточного большого числа случайных возмущений, влияющих на параметры процесса и в конечном итоге определяющих качество полученного изделия. На основе полученных расчетных зависимостей возможна динамическая коррекция коэффициента k_{dt} в процессе сварки, что позволит более

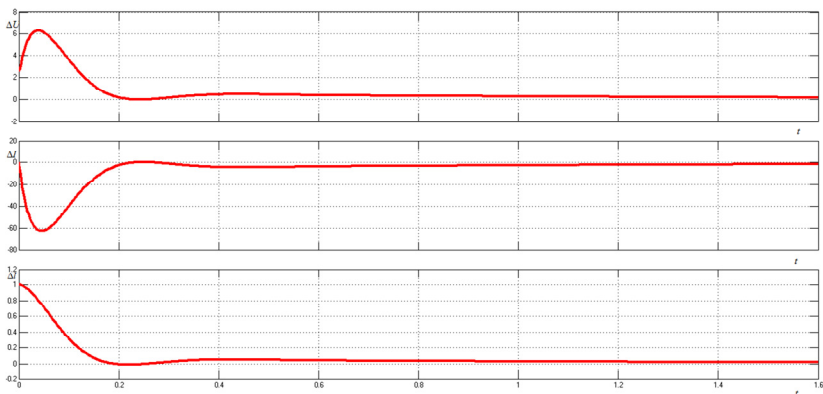


Рис. 3. Переходный процесс при возмущении по длине дуги в рабочей точке $U_0 = 28$ В и $I_0 = 120$ А

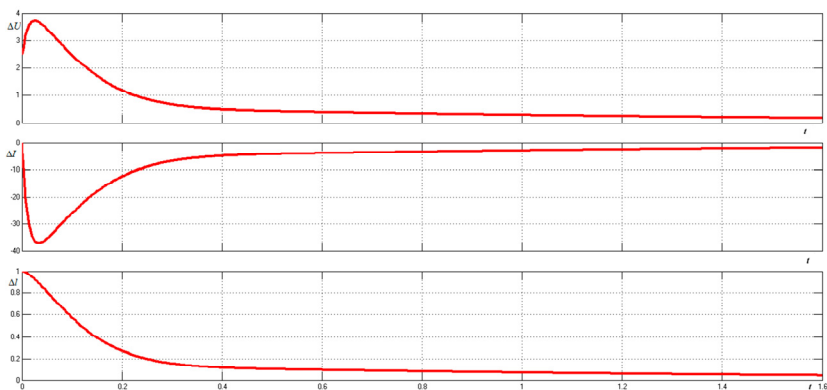


Рис. 4. Переходный процесс при возмущении по длине дуги в рабочей точке $U_0 = 358$ В и $I_0 = 260$ А

Результаты

Полученная модель на качественном уровне достоверно отражает основные закономерности характерные для рассматриваемых типов оборудования с системой автоматического регулирования напряжения дуги по ее длине.

Предложена модифицированная модель дуги базирующаяся на принятых на практике допущениях и позволяющая учитывать расширенный диапазон тока дуги.

Предложенная модель может быть положена в основу адаптивной системы управления, одной из важных функций которой может быть автоматическая идентификация параметров дуги в процессе сварки.

На основе представленной модели могут быть разработаны методики расчета параметров различных вариантов статических вольт-амперных характеристик дуги.

-
1. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
 2. *Степанов А. П., Сотокина Ю. В., Чернова С. А.* Одномерные модели электрической сварочной дуги, Теория и практика сварочного производства // Вест. инженерной школы ДВФУ. 2013. № 2 (15). С. 32–40.
 3. *Ленивкин В. А., Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н.* Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
 4. *Пентегов И. В.* Математическая модель столба динамической электрической дуги Автоматическая сварка. 1976. № 6. С. 8–12.
 5. *Пентегов И. В., Сидорец В. Н.* Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги // Автоматическая сварка. 1989. № 2. С. 33–36.
 6. *Верещаго Е. Н., Костюченко В. И.* Модель электрической дуги в MATLAB/SIMULINK. Электроэнергетика и электротехника. 2013. № 2. С. 40–46.
 7. *Кондрашов В. Е.* Королев С.Б. MATLAB как система научных технических расчетов. М.: МИР, 2002. 633 с.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ УЗЛОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

К. А. Ваганов, Н. С. Мушников, И. В. Юшков

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Статья содержит краткое описание процесса изготовления робота-гексапода на 3D-принтере методом послойного наплавления. Предложены возможные решения выявленных недостатков при печати деталей. Высказано предложение по прочностному анализу печатных конструкций.

The article contains brief description of hexapod robot producing via Fused Deposition Modeling (FDM) on a 3D-printer. Possible solutions of revealed shortcomings of printed parts were suggested. A proposal for the structural analysis of printed designs was made.

В рамках курсового проекта требовалось разработать и воплотить в жизнь конструкцию робота-гексапода. В нашем распоряжении имелся 3D-принтер, работающий по технологии FDM, и было принято решение изготовить большинство деталей робота из ABS-пластика.

Изготовление объектов методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling – FDM) на 3D-принтере известно давно – с конца 1980-х гг. [1]. На широкое распространение данного метода, в том числе и в промышленном производстве, повлияли следующие достоинства:

- 1) скорость изготовления;
- 2) простота изготовления;
- 3) дешевизна расходных материалов;
- 4) удовлетворительная точность;

5) хорошие технические характеристики ABS-пластика, в первую очередь массовые, обусловленные малой плотностью (около $1,05 \text{ г/см}^3$) и прочностные (41 МПа и 22 МПа прочность на изгиб и предел прочности на разрыв соответственно).

Учет послойного наплавления материала требует корректировки и процесса проектирования, т. к. большинство современных теорий и методик проектирования неразъемных деталей адаптированы к последующему формообразованию резанием, литьем или штампованием. Подробнее про нюансы проектирования ниже. А сейчас перечислим ос-

новые этапы процесса изготовления несущих деталей нашего робота-гексапода:

- 1) Разработка 3D-модели робота в CAD-системе (рис. 1).



Рис. 1. 3D-модель робота-гексапода

- 2) Отбор компонентов конструкции, допустимых к изготовлению из ABS-пластика, и экспорт их 3D-моделей в формат STL (*STereo Lithography*).

- 3) Импорт моделей в САМ-программу конкретного устройства быстрого прототипирования (3D-принтер). Пользователь с учетом особенностей послойной печати рационально располагает детали на виртуальной рабочей платформе 3D-принтера и задает параметры, определяющие механические и эстетические свойства. Далее следует подготовка управляющего кода (установленные на виртуальной платформе объекты подвергаются математической обработке и разделению на слои, с последующим расчетом траектории движения экструдера) (рис. 2).

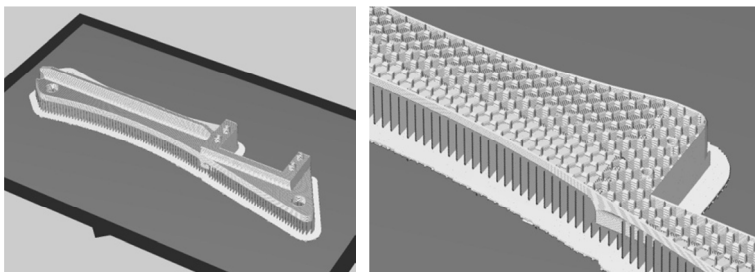


Рис. 2. Предварительный просмотр подготовленного объекта для печати в САМ-программе

4) Процесс послойной печати в Декартовой системе координат (рис. 3).

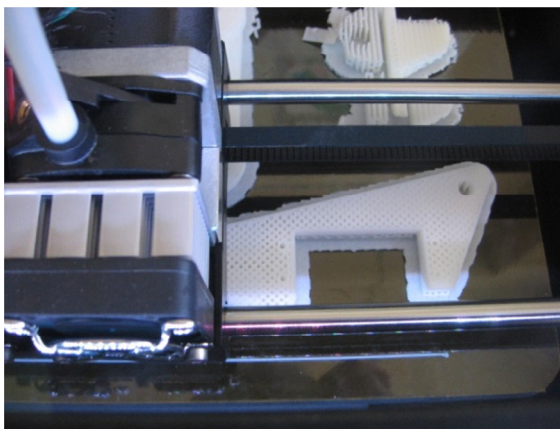


Рис. 3. Процесс послойной печати элементов робота-гексапода на 3D-принтере (заполнение материалом – 50 %)

5) Отделение вспомогательных элементов (основания и системы опор нависающих частей) от поверхностей деталей. В случае использования материала типа Frosted Detail Plastic или Strong & Flexible Plastic (для заполнения внутренних пустот при печати) его удаляют после окончания печати вымыванием и с последующей «чистовой» обработкой изделия (механической либо химической) (рис. 4).



Рис. 4. Изготовленные детали

6) Сборка робота с электронными и электромеханическими компонентами (рис. 5).

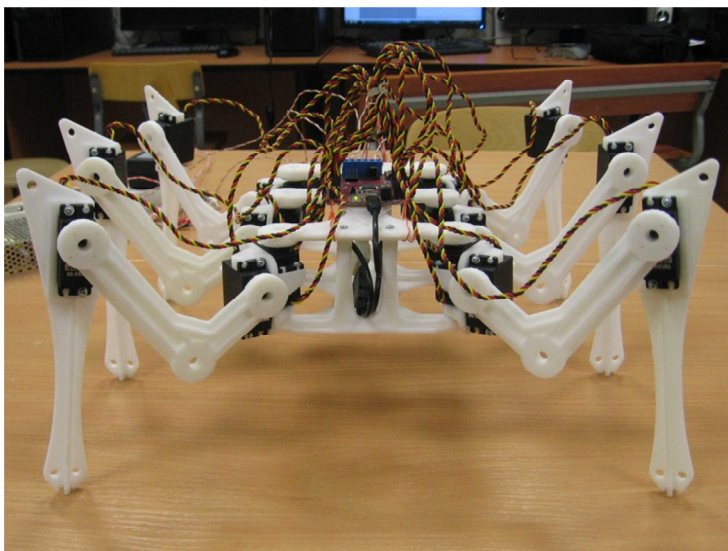


Рис. 5. Опытный образец робота-гексапода в сборе

Наш первый опыт изготовления деталей на 3D-принтере и тестирования робота-гексапода выявил ряд проблем и недостатков:

1) Анизотропия механических свойств, обусловленная послойностью печати. Небольшие по диаметру цилиндрические элементы, напечатанные поперечно оси не выдерживают рабочие радиальные нагрузки (в нашем случае – это посадочные места под подшипники качения) (рис. 6). Разрушение происходит вдоль напечатанных слоев.



Рис. 6. Посадочное место под внутреннее кольцо подшипника качения ($\varnothing 4$ мм)

При этом стоит отметить, что цилиндрические элементы бóльшего диаметра довольно жесткие. Однако увеличение их высоты приводит к отклонению от вертикали, которое в дальнейшем может помешать сборке.

Учитывая данную проблему, подобные мелкие и ответственные элементы лучше изготовить отдельно и из другого материала.

2) Отклонение от заданных размеров и цилиндричности формы отверстий (рис. 7).

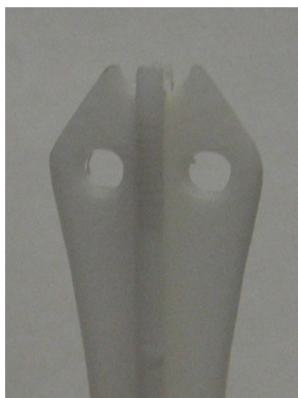


Рис. 7. Сквозные отверстия в детали робота-гексапода

Эти отклонения зависят от диаметра отверстия и скорости движения экструдера по окружности. Последняя в процессе создания окружности отверстия на слое, как правило, больше, чем при обводке внешнего контура. В результате этого движения становятся более частыми, что приводит под влиянием инерционных сил к «многоугольной» форме отверстия. Особенно негативное влияние на его форму оказывает слой, с которого его контур начинает наплавляться. Таким образом, если отверстие посадочное, следует учесть вероятную несобираемость конструкции на этапе проектирования (увеличение диаметра в 3D-модели) или программно, снижая скорость движения экструдера.

4) На некоторых звеньях имеются оплавившиеся радиальные скругления (рис. 8). К сожалению, САМ-программа не установила в этих местах вспомогательные опоры. Во время печати с каждым новым слоем данные участки начинали загигаться к соплу экструдера все сильнее. Экструдер, задевая отгибающиеся участки слоев после смены направления движения, дополнительно их подплавлял.



Рис. 8. Качество скругления, напечатанного снизу

Кроме послойного наплавления материала, важной особенностью является возможность изменения внутренней структуры изготавливаемых компонентов, а именно изменения процента заполнения материалом тела объекта (см. рис. 2, 3). Это вносит неудобство в процесс обоснования прочности конструкции теоретическими расчетами, так как принято допускать однородность и 100 %-ю заполненность материалом рассчитываемых компонентов (за исключением особых случаев).

В связи с этим нами предпринята попытка выявить критерий приблизительной оценки прочности изготавливаемых на 3D-принтере деталей на этапе их проектирования. Для этого:

1) Было распечатано несколько образцов (40x40x5 мм) с различным процентом заполнения материалом (рис. 9).



Рис. 9. Тестовые образцы, дающие информацию о зависимости устанавливаемого процента заполнения от размеров составляющих структуру ячеек (процент заполнения слева направо: 10 %, 50 %, 30 %)

2) Произведены замеры значимых элементов внутренней структуры с последующим построением 3D-моделей прямоугольных брусков (20x20x100 мм) с различной внутренней структурой, соответствующей

определенному проценту заполнения, в нескольких вариантах ее ориентации относительно наружной оболочки (рис. 10).

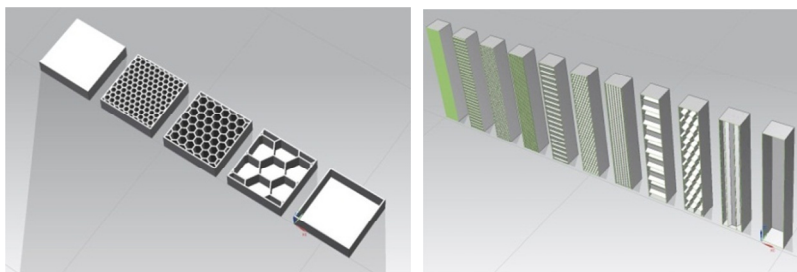


Рис. 10. 3D-модели тестовых образцов в разрезе
(процент заполнения слева направо: 100 %, 50 %, 30 %, 10 %, 0%)

3) Полученные 3D-модели импортированы в САЕ-программу (ANSIS), где произведено построение конечно-элементной сетки, задание граничных условий и тестовых нагрузок (сжатие, растяжение, изгиб) для каждого образца, с различной ориентацией внутренней структуры относительно приложенных нагрузок (рис. 11) [2, 3].

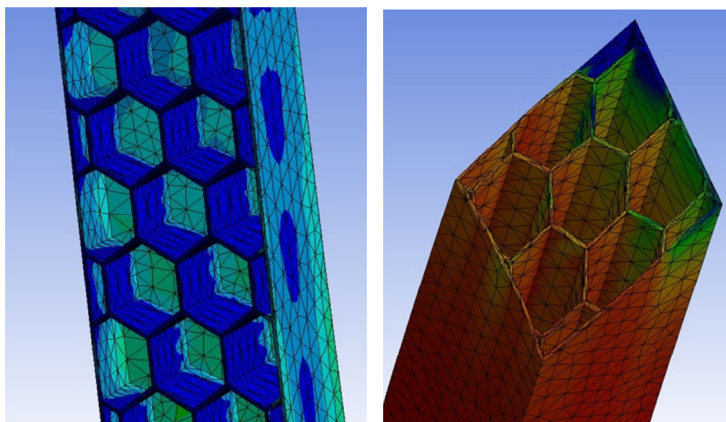


Рис. 11. Расчет в САЕ-системе

4) Статический расчет, анализ результатов, вывод приблизительных зависимостей прочности детали от процента заполнения.

Следует обратить внимание, что даже такие простые по форме детали из-за сложной внутренней структуры потребовали значительное время на расчет.

Таким образом, полученные зависимости можно применять при расчете проектируемых деталей и узлов, изготавливаемых на 3D-принтере. В этом случае расчет можно будет производить как для 100 %-го заполнения, с последующей корректировкой результата, используя упомянутые зависимости в виде коэффициентов.

При проектировании необходимо учитывать технологию производства и разрабатывать детали, ориентированные на формообразование именно печатью (а не вырезанием, как прежде, в подавляющем большинстве случаев), но не в ущерб функциональности, необходимо искать компромисс. В частности, это касается того как располагать выступы и ребра на теле детали. Формы же деталей могут быть самыми разнообразными, ограничивающиеся только фантазией творца, рабочим объемом 3D-принтера и возможностями алгоритмов печати.

В целом конструкция получилась довольно прочной, робот осуществляет заданные перемещения. Звенья выдержали тестовые нагрузки и оставались целыми, работа механизма оставила удовлетворительное впечатление за исключением нескольких повредившихся осей под подшипники и небольшого прогиба некоторых звеньев.

Данный вариант конструкции продемонстрировал нам возможности трехмерной печати деталей методом послойного наплавления. С учетом обнаружившихся проблем модель робота-гексапода подвергнется корректировке и будет заново распечатана.

1. *Chua C. K., Leong K. F., Lim C. S.* Rapid prototyping: principles and applications. World Scientific, 2003.

2. *Огородникова О. М.* Исследовательская функция программ CAE в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM // Вестн. машиностроения. 2012. № 1. С. 25–31.

3. *Огородникова О. М.* Введение в компьютерный конструкционный анализ. Екатеринбург: УрФУ, 2001. 47 с.

Благодарность

Тихонову Игорю Николаевичу (кандидат технических наук, заведующий кафедрой электронного машиностроения Механико-машиностроительного института УрФУ).

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К ПРОИЗВОДСТВУ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

Ю. В. Денисов, Н. С. Складорова

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Рассматриваются прецизионные, миниатюрные приборы с требуемыми функциональными характеристиками, используемые в авиации, морском транспорте, движущихся объектах. Процессный подход к производству подразумевает использование научного сопровождения изготовления приборов; использование современных систем управления производством, использование статических методов в расчетах и технологических процессах.

We consider precision, miniature devices with desired functional characteristics, used in aviation, maritime transport, and other moving objects. The process approach to production involves the use of scientific support of manufacturing the equipment; the use of modern production management systems, the use of static methods in calculations and processes.

Появляющееся поколение прецизионных приборов характеризуется применением новых конструктивных решений; уменьшением геометрических и массовых характеристик (миниатюризация); большой концентрацией различных физических процессов, определяющих действие одного прибора в ограниченном объеме; использованием новых материалов для изготовления приборов; уменьшением допусков на функциональные характеристики при условии обеспечения их стабильности.

Решение проблемы освоения и производства приборов высокого качества нуждается в поиске новых подходов, которые должны базироваться на углубленном и тщательном анализе объектов производства (выпускаемые приборы) и объектов производственной среды (оборудование, технология, инструмент).

Для совершенствования производства прецизионных приборов могут быть использованы:

1. Система научного сопровождения производства с применением соответствующих инструментальных средств.
- 1.1 Установление связи между функциональными характеристиками приборов, конструктивными параметрами и параметрами технологического процесса.

- 1.2 Анализ конструктивных особенностей приборов в сочетании с уровнем современных технологий, оборудования.
- 1.3 Тщательная технологическая подготовка производства с анализом деталей на технологичность; выбором параметров технологических процессов, обеспечивающих выходные характеристики приборов.
- 1.4 Применение вероятностных моделей, учитывающих отклонение параметров от среднего значения, и вариации результатов деятельности.
2. Управляющие производственные системы (бережливое производство, шесть сигма и др.).
- 2.1 Использование принципа – качество определяется процессом; проблемы в производстве создаются не конкретными людьми, а процессами, используемыми в деятельности; повышение выхода годного достигается уменьшением вариации параметров процесса.
- 2.2 Соблюдение фокуса на потребителя с учетом улучшения качества в двух направлениях – улучшение внешнего и внутреннего качества; раскрытие способностей всех работников, участвующих в производстве; постоянное улучшение производства в т.ч. с использованием CAD-CAM-CAE систем; доведение элементов системы управления до каждого рабочего места с минимизацией потерь на каждом рабочем месте; построение карт потока создания ценностей – текущего состояния потока, будущего состояния потока.
3. Использование статических методов при определении функциональных характеристик приборов; для уменьшения вариации параметров технологического процесса, увеличения выхода годного, уменьшения технологического отсева.

В качестве примеров применения предложенных методов рассмотрены два класса прецизионных приборов – частотные датчики и инерционные приборы. Частотные датчики устанавливают зависимость между частотой колебаний и ускорением движущегося объекта, и используется для определения ускорения, рис. 1.

Прибор работает следующим образом: стержневые резонаторы находятся в режиме поперечных колебаний, которые задаются электромагнитным возбудителем с учетом растягивающей или сжимающей профильной силы. Полученные колебания воспринимаются приемной электромагнитной системой, от которой сигналы после усиления поступают на электромагнитный преобразователь. Прибор имеет два канала, включенных по дифференциальной схеме, и настраивается на разностную частоту $\Delta f = f_1 - f_2$, где f_1 – частота I канала, f_2 – частота II канала. При действии на прибор линейного ускорения происходит возрастание частоты I канала f_1 и убывание частоты II канала f_2 . Разность меж-

ду частотой канала для определенного значения ускорения и при его отсутствии представляет собой чувствительность соответствующего канала. Разностная частота Δf также изменяется при действии линейного ускорения и для каждого значения ускорения имеет вполне определенное значение. Функциональными характеристиками прибора являются: частота каналов, разностная частота, зависимость частоты I и II каналов от ускорения (чувствительность прибора).

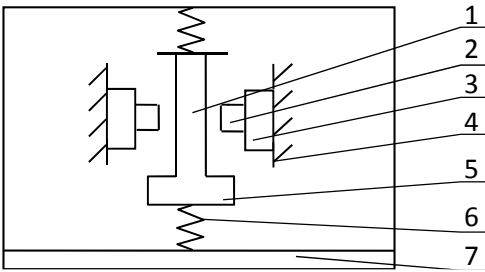


Рис. 1. Конструктивная схема датчика ускорения

Конструктивная схема прибора включает следующие основные элементы: чувствительные элементы I и II каналов, которые состоят из выполненной в виде единой детали резонаторов 1; упругой перемычки 6; инерционного тела 5; магнитную систему, которая содержит магниты 2; магнитопроводы 3; экран 4; основание 7

На рис. 2 приведена концептуальная модель прибора, служащая для формирования множества системных показателей и алгоритмов их вычисления.

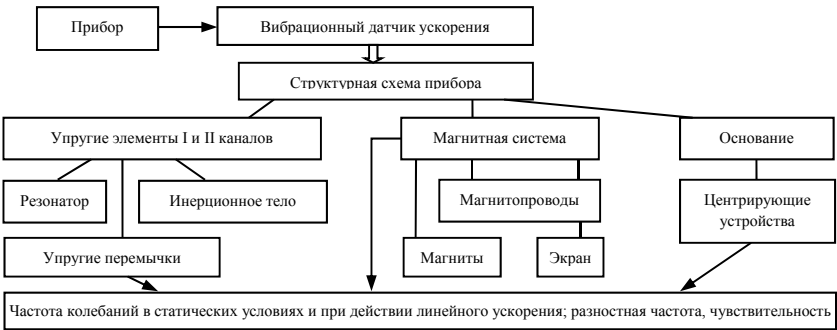


Рис. 2. Концептуальная модель частотного датчика

Для решения задачи определения функциональных характеристик рассмотрены колебания механических систем с распределенными параметрами с учетом внутреннего трения и случайного характера параметров системы [1, 2, 3].

На рис. 3 показана вычисленная на основании аналитических зависимостей зависимость разностной частоты колебаний от ускорения (функциональная характеристика). Одним из основных конструктивных параметров, влияющих на функциональные характеристики датчика является эффективный модуль упругости материала, зависящий от режимов термической обработки элинварного сплава, размеров и свойств дефектного слоя, появляющегося при механической обработке, рис. 4 (параметры технологического процесса).

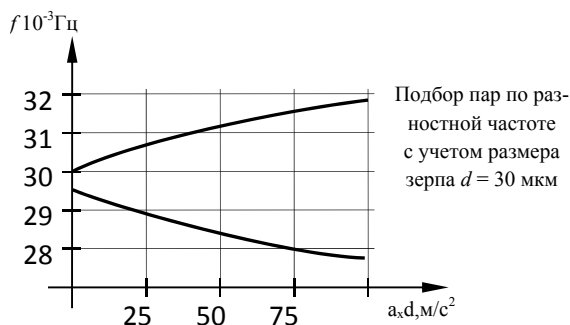


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний от ускорения

Инерционные приборы используются для измерения ускорения некоторой точки движущегося объекта, скорости (после интегрирования) и координат (после вторичного интегрирования) точки. Для решения задачи применяются законы механики относительного движения в неинерционной системе отсчета и общие теоремы динамики в относительном движении [4]. Инерционный прибор с поступательно движущимися чувствительными элементами представлен на рис. 5.

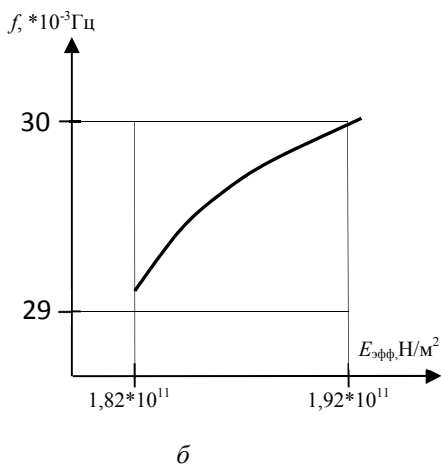
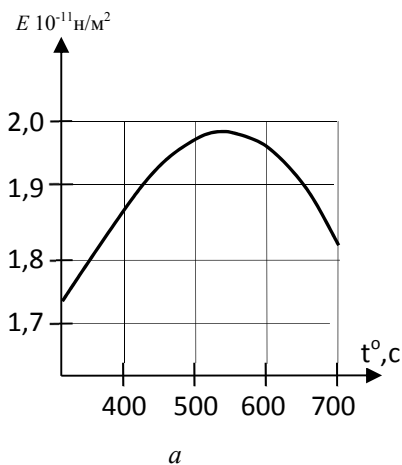
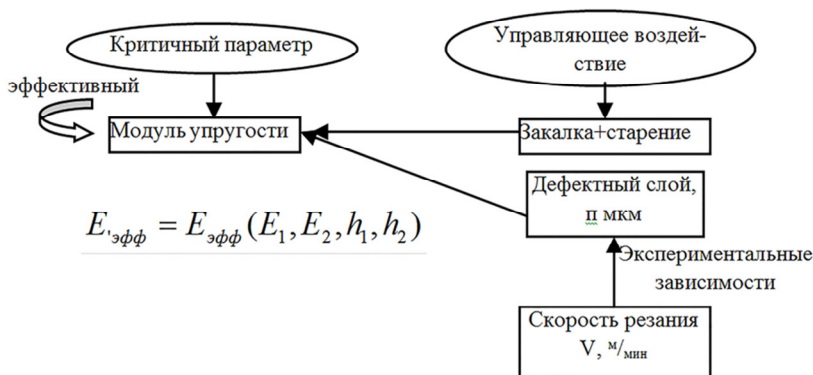


Рис. 4. Влияние эффективного модуля упругости на функциональные характеристики датчика ускорения

$E_{эфф}$ – эффективный модуль упругости, E_1, E_2 – модули упругости основного материала и дефектного слоя; h_1, h_2 – толщины основного материала и дефектного слоя; а – зависимость модуля упругости от температуры; б – зависимость частоты колебаний от эффективного модуля упругости

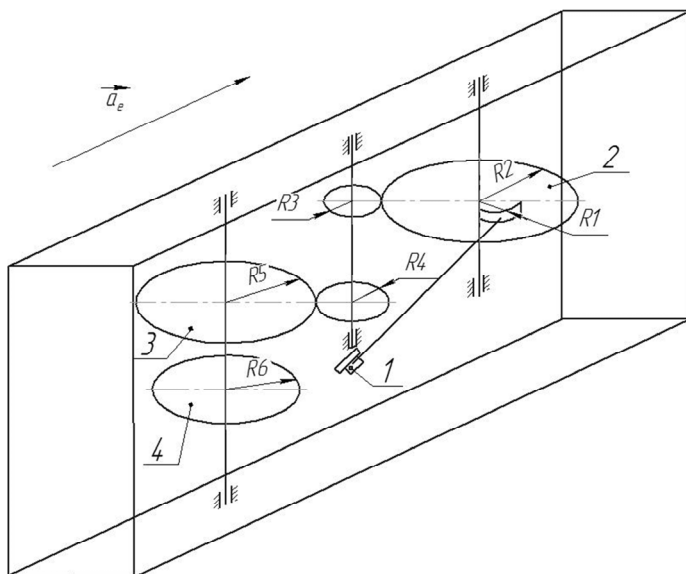


Рис. 5. Кинематическая схема инерционного прибора:
1 – чувствительный элемент, 2 – зубчатый сектор, 3 – зубчатая передача; 4-диск магнитного тормоза

Концептуальная модель инерционного прибора показана на рис. 6.

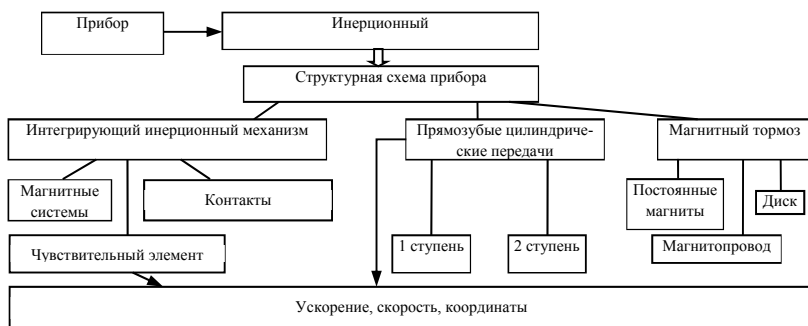


Рис. 6. Концептуальная модель инерционного прибора

Для определения закона движения чувствительного элемента (времени срабатывания прибора) применена теорема об изменении кинетической энергии в относительном движении.

Знание закона движения позволяет проанализировать влияние конструктивных параметров прибора и коэффициента нарастания ускорения на время срабатывания прибора, рис. 7,8.

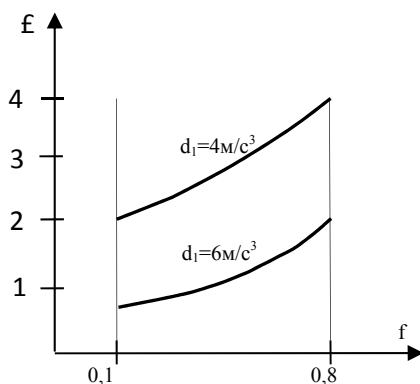


Рис. 7. Зависимость безразмерного времени срабатывания от коэффициента трения при различных законах нарастания ускорения

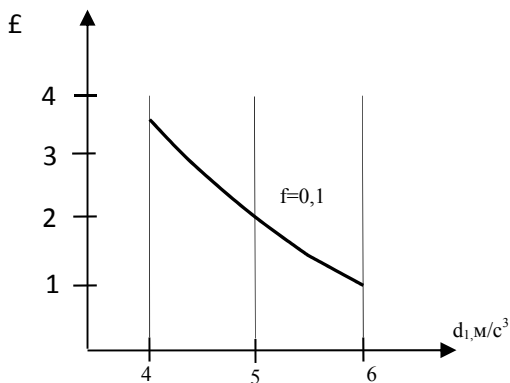


Рис. 8. Зависимость безразмерного времени срабатывания от коэффициента нарастания ускорения

Отметим, наибольший интерес полученные результаты представляют для решения задачи синтеза конструктивных параметров прибора, причем количественные результаты согласуются с данными [5].

Заключение

1. Предложены новые подходы, позволяющие существенно повысить эффективность производства прецизионных приборов с использованием научного сопровождения и управляющих производственных систем.

2. В качестве примеров для двух классов приборов установлены аналитические и экспериментальные зависимости между функциональными характеристиками приборов, конструктивными параметрами и параметрами технологического процесса.

3. Для частотных датчиков, практически впервые, показано влияние режимов термообработки элинварного сплава на частоту колебаний.

4. Для инерционных приборов, практически впервые, показано влияние режимов механической обработки на определение скорости движущегося объекта.

5. Предложенные методы носят достаточно универсальный характер и могут быть использованы при производстве широкого класса приборов и конструировании приборов нового поколения.

1. *Ден-Гартог Дж. П.* Механические колебания. М.: Физматгиз, 1960. 580 с.

2. *Пановко Я. Г.* Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я. Г. Пановского. М.: Физматгиз, 1960. 344 с.

3. *Пугачев В. С.* Теория случайных функции и ее применение к задачам автоматического управления. М.: Физматгиз, 1962. 884 с.

4. *Ишлинский А. Ю.* Механика относительного движения и силы инерции / А. Ю. Ишлинский. М.: Наука, 1981. 192 с.

5. Справочник конструктора РЭА. Компоненты, механизмы, надежность / под ред. Р. Г. Варламова. М.: Радио и связь, 1985. 426 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭТАПА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РЕГИОНА

И. А. Завьялов, Р. Д. Абдулов, Г. А. Маркин

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В статье рассматривается концепция жизненного цикла применительно к транспортной системе Свердловской области. Разработана соответствующая модель жизненного цикла, обоснованы ее параметры и охарактеризованы ее этапы. Выявлены формальные признаки транспортной системы, определяющие этап развития. Также предложены рекомендации к развитию транспортного комплекса Свердловской области.

In this article we described a concept of a lifecycle in relation to transport system of Sverdlovsk region. A corresponding lifecycle model was worked out, its features were grounded and stages were characterized. We revealed formal criteria of transport system that determine a stage of development. We also gave recommendations concerning the development of Sverdlovsk region's transport complex.

Жизненный цикл – это совокупность стадий развития, которые проходит система, организация за время своего существования.

Концепция жизненных циклов возникла более 50 лет назад [1]. За это время ее применили не только к организациям, но и к отраслям промышленности, к продукции, к проектам. Модель жизненного цикла позволяет оценить существующую ситуацию, выявить проблемы и найти способы решения сложившихся проблем. Очевидно, что модель жизненного цикла обретает свои особенности, если ее применять к различным объектам исследования, и эти особенности должны быть учтены. В нашем случае транспортная система Свердловской области имеет свою специфику. Транспортная система региона начала активно развиваться в начале двадцатого века. Особую роль в формировании инфраструктуры сыграла промышленность, ведь Свердловская область является одним из крупнейших индустриальных районов России. Развитая железнодорожная сеть, большое количество автомобильных дорог, воздушные пути – все это обусловлено не только историческими факторами, большим грузооборотом региона, но и особым географическим положением.

В существующей методологии исследования жизненного цикла выделяют множество различных моделей, самые известные из которых – модель М. Хайре, модель И. Адизеса, модель Д. Миллера и П. Фризена. Все они различны по своей структуре и количеству этапов развития, также стоит отметить, что они были применены к разным объектам исследования.

Для рассмотрения жизненного цикла транспортной системы стоит учитывать такие параметры, как состояние (отражает характер инфраструктуры и качественное исполнение ее элементов), масштаб, динамика (показывает уровень грузооборота и способность системы его реализовывать), формализация (отражает уровень регуляции) и экономическая эффективность (показывает, насколько экономически целесообразен тот или иной тип транспортной системы).

Состав транспортного комплекса Свердловской области представлен широким спектром видов транспорта: автомобильный, железнодорожный, авиатранспорт, речной, трубопроводный. Из них особую значимость в экономике региона приобретают железнодорожный и автомобильный. Связано это в первую очередь с долей этих типов транспорта в грузообороте. Трубопроводный транспорт представлен в виде транзитных нефте- и газопроводов. Речной транспорт имеет незначительную долю в грузо- и пассажирообороте из-за несоответствия уровня состояния водных путей требованиям эксплуатации. Воздушный транспорт ввиду технических причин связан в основном с пассажирооборотом.

Для выявления особенностей жизненных циклов транспортного комплекса были созданы характеристики стадий на основе существующих моделей (табл. 1).

Данную модель целесообразно применить к наиболее востребованным типам транспортной системы Свердловской области: автомобильному и железнодорожному.

Рассмотрим автомобильный комплекс Свердловской области (рис. 1). Для того чтобы определить его этап жизненного цикла, применим таблицу с характеристиками:

1) Состояние. Техническое состояние автомобильной сети не в полной мере отвечает спросу на грузовые и пассажирские перевозки. Около 75 % дорог по протяженности имеют низкую техническую категорию, недопустимый уровень состояния имеют 3870 км (35,8 % от общей протяженности)[9]. Инфраструктура развита неравномерно: по оснащенности комплекса отстают северная и восточная части региона.

2) Масштаб. Недостаточная интеграция дорожно-транспортной системы в федеральную систему. На данный момент отсутствуют дорож-

ные сообщения федерального значения с экономически важными соседними северными регионами.

3) Динамика. Основные статистические показатели грузооборота и пассажирооборота автомобильного транспорта.

Таблица 1

Характеристики стадий жизненного цикла транспортной системы

Характеристика	Зарождение	Развитие	Зрелость	Спад
Состояние	Инновационный характер инфраструктуры	Динамичное расширение инфраструктурной сети, качественное ее развитие	За предыдущие этапы накоплен значительный инфраструктурный задел	Упадок инфраструктуры, частичное или полное прекращение обслуживания
Масштаб	Локальный	Региональное расширение	Межрегиональная интеграция	Частичная ликвидация транспортной системы
Динамика	Появление перспективного типа транспортной системы, привлечение части грузопотока	Спрос на транспортные услуги превышает предложение, активное развитие инфраструктуры	Снижение темпов роста, выравнивание спроса и предложения при достижении уровня насыщения	Снижение грузооборота, отказ от пользования данного типа транспортной системы, поиск альтернативы
Формализация	Проектная форма	Появление государственного регулирования и расширение законодательной базы	Устойчивая законодательная база	Дезактуализация правовых норм
Экономическая эффективность	Перспективность использования	Начало массовой коммерческой эксплуатации	Максимальная эффективность	Низкая эффективность

Наблюдается снижение объема грузоперевозок с 1990 г. Это связано с неблагоприятной экономической ситуацией в России, которая предопределила отрицательную динамику грузоперевозок региона.

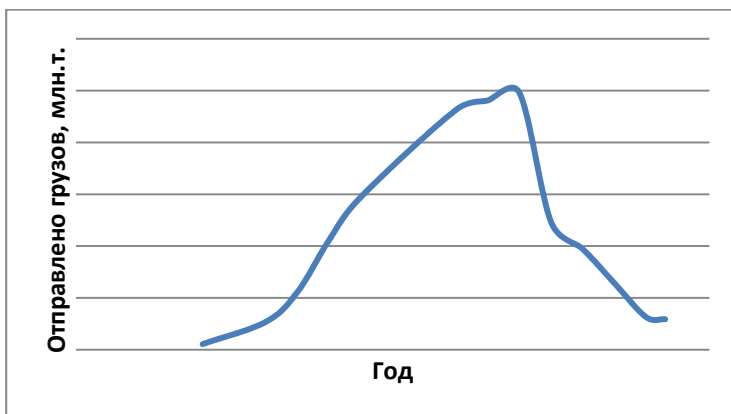


Рис. 1. Объем грузоперевозок в Свердловской области автомобильным транспортом в период с 1940 по 2013 гг.

Снижение пассажиропотока в регионе связано со всеобщим спадом внутренней мобильности населения после распада СССР [10] (рис. 2).

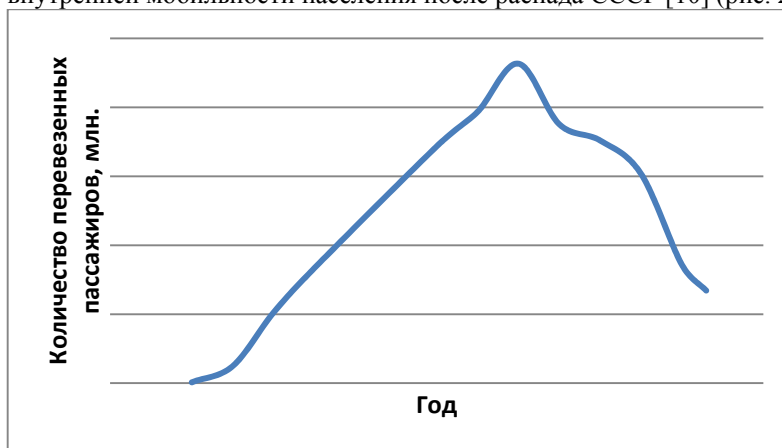


Рис. 2. Объем пассажирских перевозок в Свердловской области автомобильным транспортом в период с 1950 по 2013 гг.

4) Формализация. Законодательная база по регулированию данной системы сформирована.

5) Экономическая эффективность. Автомобильный транспорт по-прежнему остается наиболее маневренным, его пути охватывают гораздо большую территорию, нежели другие типы транспорта. Однако сни-

жение грузооборота в данном секторе говорит о не полной реализации его экономического и технического потенциала.

Несмотря на отрицательную динамику, можно сделать вывод о том, что данный тип транспортной системы находится в стадии развития. На данном этапе необходима программа поддержания и создания уникальной инфраструктуры региона, так как именно автомобильный транспорт при своей значительной удельной стоимости перевозки имеет лучшую маневренность.

Теперь рассмотрим данную модель жизненных циклов применительно к железнодорожному транспорту.

1) Состояние. Высокая изношенность подвижного состава. Транзитные и внутренние потоки грузов и пассажиров разведены не в полной мере, этим обоснован высокий уровень изношенности железнодорожных путей.

2) Масштаб. Налажена система транзитных перевозок, но отсутствуют северные сообщения ввиду ряда технических и экономических факторов.

3) Динамика. Основные статистические показатели грузооборота и пассажирооборота железнодорожного транспорта.

Несмотря на то, что объем грузоперевозок региона резко снизился из-за экономического кризиса, вызванного переходом к рыночной экономике, в скором времени положительная динамика была восстановлена. Этот факт говорит о стабильности данной системы (рис. 3).

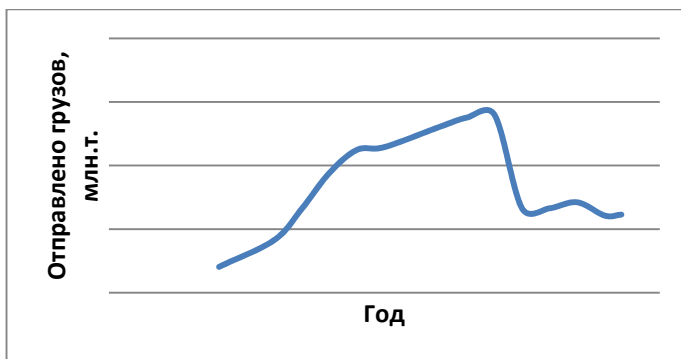


Рис. 3. Объем грузоперевозок в Свердловской области железнодорожным транспортом в период с 1940 по 2013 гг.

Как уже было отмечено, уровень мобильности населения снизился после распада СССР. Этим и был обусловлен резкий спад пассажиропотока [10] (рис. 4). Однако в настоящее время ситуация стабилизируется.

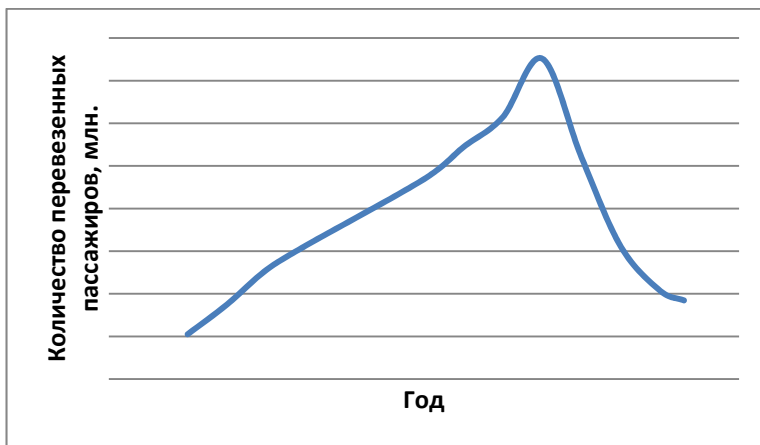


Рис. 4. Объем пассажирских перевозок в Свердловской области железнодорожным транспортом в период с 1950 по 2013 гг.

4) Формализация. Наличие устоявшейся законодательной базы.

5) Экономическая эффективность. Структура грузовых перевозок в основном представлена каменным углем, строительными материалами, нефтепродуктами, рудами и металлами. Железнодорожный транспорт является наиболее целесообразным для перевозки данных грузов на дальние расстояния ввиду своей большой грузоподъемности. Поэтому, с экономической точки зрения, он достаточно эффективен.

Исходя из вышесказанного, стоит отметить, что железнодорожный тип транспорта находится в стадии зрелости. Чтобы жизненный цикл не перешел в свою завершающую стадию, необходимо предпринять меры по восстановлению технопарка и железнодорожного полотна, а также меры по экстенсификации путей.

Транспортный комплекс Свердловской области загружен и не отвечает спросу на грузооборот и пассажиропоток, однако это разрешимая проблема. Государство и правительство области принимают соответствующие меры по решению данных вопросов, уже разработаны программы, направленные на развитие транспортной системы региона.

В заключении стоит отметить, что теория жизненных циклов имеет системный характер и позволяет прогнозировать и управлять развитием

различных объектов. Для дальнейших исследований могут быть разработаны рекомендации по управлению жизненным циклом транспортной системы и созданию алгоритмов использования тех или иных рыночных механизмов на каждом из этапов.

-
1. *Широкова Г. В.* Жизненные циклы организации: концепции и российская практика : монография. СПб. : Издат. Дом С.-Петерб. гос. ун-та, 2007. 480 с.
 2. Управление жизненным циклом корпорации / Ицхак К. Адизес ; пер. с англ. В. Кузина ; под науч. ред. А.Г. Сеферяна. М. ; СПб. ; Нижний Новгород : Питер, 2007. 384 с.
 3. Регионы России. Социально-экономические показатели. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1138623506156.
 4. Народное хозяйство Свердловской области: стат. сб. / ЦСУ РСФСР, Стат. упр. Свердл. обл. Свердловск: Госстатиздат, 1962. 231 с.
 5. Народное хозяйство Свердловской области : стат. сб. к 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции / ЦСУ РСФСР, Стат. упр. Свердл. обл. Свердловск: Статистика, Свердл. отд-е, 1967. 146 с.
 6. Свердловская область за 50 лет (Цифры и факты). Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1984. 253 с.
 7. Свердловская область в цифрах, 1981–1985 гг. : стат. сб. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1987. 126 с.
 8. Народное хозяйство РСФСР в 1970 году : стат. ежегодник. М.: Статистика, 1971. 488 с.
 9. Постановление от 11 октября 2010 г. № 1479-ПП «Об утверждении областной целевой программы „Развитие транспортного комплекса Свердловской области“ на 2011–2016 годы».
 10. Зайончковская Ж.А. Федеральные округа на миграционной карте России // Регион: экономика и социология. 2012. № 3 (75). С. 3–18.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ УЧЕБНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СКЛАДОВ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Л. А. Захаров, К. С. Цалко, С. Н. Шарин

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В статье рассмотрены проблемы применения в образовательном процессе вузов и ссузов учебных автоматизированных складских систем. Показана необходимость применения такого оборудования для повышения уровня подготовки обучающихся и приближения учебных задач к производственным. Приведены требования к учебным стендам, рассмотрены существующие конструкции, предлагаемые российскими и зарубежными производителями. Обоснована необходимость разработки модульной учебной автоматизированной складской системы и рассмотрена возможность ее изготовления на основе компонентов отечественных производителей.

The problem of training automated storage and retrieval system (ASRS) introduction in the learning process of technical specialties students of universities and colleges is considered in the article. The necessity of such systems application in order to increase the students' level of performance and approach the training tasks to manufacturing ones is shown there. The article describes the requirements for ASRS and considers existing constructions offered by Russian and foreign manufacturers. The necessity of modular training ASRS development is substantiated in the article as well as the possibility of such system manufacturing based on the components by domestic producers.

Целесообразность внедрения гибких производственных систем на предприятиях крупносерийного и массового производства была доказана еще в середине 80-х годов прошлого столетия, данный вопрос не потерял актуальности и на сегодняшний день. Одним из наиболее распространенных составляющих ГПС являются автоматизированные склады.

Автоматизированные складские системы (АСС) находят свое применение в различных сферах, начиная от роботизированных аптек и заканчивая промышленными предприятиями.

Тем самым формируется потребность в компетенциях по созданию и обслуживанию оборудования АСС у выпускников вузов, ссузов, специалистов предприятий.

Для решения этой проблемы необходимо применение в образовательном процессе роботизированных учебных стендов, по своей структуре и функционалу максимально приближенных к реальному производству.

Для создания учебной АСС на основе отечественных компонентов необходимо рассмотреть области применения, функции и структуру реальных используемых автоматизированных складских систем, проанализировать существующие учебные системы, определить возможные компоновки и изучить возможность создания таких систем на отечественной элементной базе.

В настоящее время существует три основных сферы применения автоматизированных складов: торговля и обслуживание клиентов, промышленное производство, офисы и архивы.

Автоматизированный склад может быть предназначен для хранения и обработки товаров на крупных оптово-розничных базах [1]. На мировом рынке из числа крупнейших представителей использующих такого вида оборудование можно выделить Amazon, Zappos, Shop24. В России технология автоматизированного склада внедрена в сети аптек «Норма», «Ригла», «Аптеки Кубани» и другие.

Данная технология находит применение в различных офисных учреждениях в связи с рядом преимуществ: оптимизация использования площадей складских помещений, порядок и ясность в организации архива, скорость при операциях по поиску материала, физическая защита документов. В России известны следующие организации, использующие подобные технологии: Российский государственный архив научно-технической документации, Яндекс, Google, P&G и другие.

Самой большой отраслью внедрения АСС являются промышленные компании. Использование автоматизированных складов в составе производственных линий дает следующие преимущества: сокращение складских площадей и штата складских работников, сокращение времени на выполнение складских и, следовательно, производственных операций. Автомобилестроение, машиностроение, электронная промышленность, химическое производство, фармацевтика – это лишь некоторые отрасли, где технология давно внедрена и активно применяется.

Среди российских предприятий, внедривших в свою производственную линию автоматизированные склады, фигурируют такие, как ОАО «АвтоВАЗ», ОАО «Кировградский завод твердых сплавов», завод корпорации «Сухой», ОАО «Ракетно-космическая корпорация „Энергия“ имени С.П. Королёва», ОАО «Сургутнефтегаз», ОАО «Машиностроительный завод» [2] и другие. Данная технология также широко применяется за рубежом.

В зависимости от области применения системы используются различные компоновочные решения и закладывается различный функционал. В данный момент автоматические складские системы способны выполнять над единицами хранения следующие функции: транспортировка как в пределах склада, так и за его пределами, сортировка, учет и хранение.

Есть у таких систем ряд функциональных недостатков, которые в данный момент решаются: робот-погрузчик не имеет возможности работать с изделиями малой конфигурации, поэтому способен манипулировать лишь тарой, в которой находится это изделие; складские системы обычно отделены от устройств транспортировки груза за пределы склада, из-за этого возникает проблема синхронизации этих устройств с его работой.

Основными модулями автоматизированных складов являются: система управления, транспортно-загрузочные устройства, стеллажи.

Классификация автоматизированных складов в зависимости от используемых компонентов представлены в виде схемы на рис. 1. Стоит отметить, что чаще всего в промышленности применяются мобильные и стационарные стеллажи.

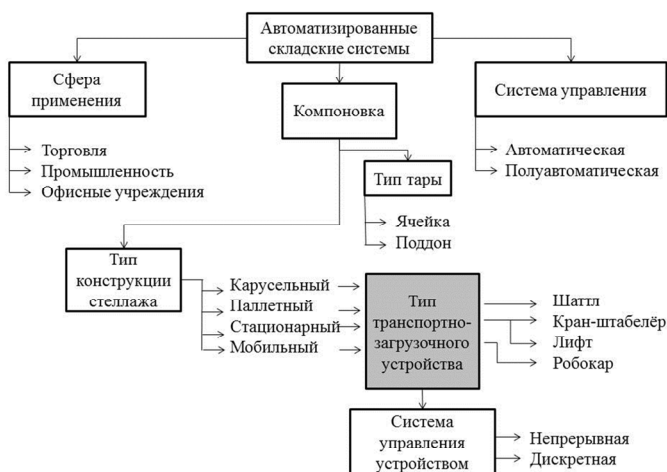


Рис. 1. Классификация роботизированных складских систем

Одной из основных частей автоматизированного склада является система управления СУАС. К основным ее функциям относятся: управление оборудованием, автоматизированное создание и ведение информа-

ционной модели склада (автоматизированный учет), управление очередями заданий на выполнение складских операций, контроль прохождения единиц хранения по заданным маршрутам [3].

Все эти функции сводятся к следующему – обеспечить максимальную плотность загрузки стеллажей, равномерность наполнения, обеспечить максимально быструю доставку груза до пользователя.

Конструктивно СУАС представляет собой комплекс программно-аппаратных средств, имеет внешние разъемы для подключения к локальной компьютерной сети предприятия, устройствам связи, устройствам бортовых систем управления роботами, а также отладочному оборудованию.

Система управления в подобных складах может использоваться трех видов: автоматическая, автоматизированная и ручная.

Автоматическая система управления подразумевает абсолютную самостоятельность системы в отличие от автоматизированной, где требуется вмешательство оператора на одном из этапов технологического процесса (например взятие груза). Ручная системы управления, требующая непосредственного участия оператора, в данной статье не рассматривается.

Структура такой системы управления представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структура системы управления

Как было отмечено выше, одной из основных функций системы управления является навигация каждого транспортно-загрузочного устройства. Она может быть реализована следующим образом: в памяти СУАС существует карта склада, где отмечено положение каждой ячейки. Согласно этой карте система составляет траекторию движения робота, выделяет конечную точку. Задачей передвижения робота и достижения точки с заданной точностью занимается система управления встроенная в робота (СУ транспортно-загрузочного устройства).

В качестве датчиков для определения достижения роботом какой-то определенной точки могут использоваться системы датчик – метка (датчик на роботе, метка на стеллаже/ячейке).

В качестве таких датчиков могут использоваться оптические, емкостные, индуктивные, RFID-датчики.

В качестве меток используются: разновидности штрих-кодовых меток, RFID-метки, метки, полученные нанесением лакокрасочных материалов определенного состава и цвета (пригодных для различения датчиком одного из типов).

Проведя анализ, можно сделать вывод о многообразии существующих вариаций исполнения автоматизированных складских систем как в аппаратной части, так и в системе управления.

При постановке задачи о комплектности образовательного стенда необходимо ознакомиться с уже существующими разработками, выявить их достоинства и недостатки.

Для начала изучим продукцию отечественных производителей.

ООО «Южно-Уральские технические системы» (г. Челябинск) выпускает линейку исследовательских учебных роботов-манипуляторов и роботизированных складских и производственных систем на их основе под торговой маркой PASKAL™.

Объединенные данные по производителям отечественного и зарубежного оборудования представлены в табл. 1.

На основе этих роботов предлагаются различные стенды, имитирующие автоматизированные склады, сборочные системы с техническим зрением, производственные линии гибкие производственные модули и системы. Однако следует заметить, что ассортимент предлагаемых модулей весьма ограничен: отсутствуют подвижные колесные (или гусеничные) транспортеры для манипуляторов, таким образом невозможно имитировать работу склада с подвижными роботами-погрузчиками; нет возможности объединить несколько роботов, транспортеров и станков в производственную линию. То есть конструкция не является полностью модульной. Также в России выпускаются роботы «Робин-1» в исполнениях с цилиндрической и сферической системами координат. По своим характеристикам они близки к указанным выше роботам PASKAL™ DELTA и OMEGA. На их базе выпускаются стенды, имитирующие работу гибких производственных модулей и автоматизированных складов.

Теперь рассмотрим конструкции, предлагаемые зарубежными производителями.

Учебные модульные гибкие производственные системы производит компания FestoAG & Co KG (Германия). Ассортимент модулей довольно широк: транспортные и раздаточные механизмы, конвейеры, стелла-

жи, устройства для сортировки изделий, станции обработки, роботы-манипуляторы MitsubishiRV-2FB. Такая система внедрена в учебный процесс Первоуральского металлургического колледжа.

Широкий спектр аналогичных учебных систем предлагает китайский производитель Dolang Technology Equipment Co., Ltd. Учебные станции имеют также модульную структуру, что позволяет собрать из них необходимую систему. Подобные системы также производит компания Lucas-Nülle GmbH (Германия).

Учебные модульные гибкие производственные системы выпускает Intelitek, Inc. (США). Система может включать в себя станции хранения изделий и заготовок, станции механической обработки, станции сборки и контроля качества, сварочные станции, конвейеры. Перемещение заготовок и сварку осуществляют роботы-манипуляторы SCORBOT-ER 4u, SCORBOT-ER 9, SCORA-ER 14, MotomanMH5. Для управления оборудованием используются программируемые логические контроллеры SiemensS7-300. Данные учебные гибкие производственные системы позволяют точно воспроизводить реальный производственный процесс. Однако в состав данных систем не входят мобильные платформы.

Сравнение применяемых в перечисленных учебных системах роботов приведено в табл. 1.

Сравнивая функции, реализованные в учебных системах, и функции реальных систем, применяемых на производстве, мы видим, что отечественные разработки в этой области весьма примитивны. Учебные гибкие производственные системы иностранных производителей позволяют имитировать широкий спектр промышленных автоматизированных и роботизированных систем; вместе с тем в состав учебных систем не входят мобильные роботы (имитирующие, например, работу широко распространенных сейчас роботизированных погрузчиков-штабелеров). Кроме того, роботы, применяемые в учебных стендах, могут захватывать предметы только определенной формы, так как они в основном комплектуются простейшими рычажными схватами с электрическим или пневматическим приводом. В связи с этим представляется целесообразной разработка учебной автоматизированной складской системы, включающей в себя стеллажи, мобильные платформы и роботов, которые могут оснащаться разными типами схватов. Такая система должна иметь модульную структуру: пользователь должен иметь возможность устанавливать дополнительные модули, расширяющие возможности базовой комплектации. Помимо этого система управления учебным складом должна быть максимально приближена к промышленным системам. Кроме того, желательно, чтобы система создавалась на отечественной элементной базе.

Таблица 1

**Сравнение характеристик роботов, применяемых
в учебных складских системах**

Изготовитель	Применяемый робот	Число осей (без учета схвата)	Грузоподъемность, кг	Тип двигателей	Наличие подвижной платформы робота
Intelitek	SCORBOT-ER 9	5	4	постоянного тока с энкодерами	да
	SCORA-ER 14	4	3		
	MOTOMAN MH5	5	5		
Южно-Уральские Технические Системы	OMEGA 1	3	4	шаговые	да
	DELTA 1	3	0,5		
	SCARA-VECTOR1	4	2		
Не известен	РОБИН-1Ц	3	0,3	постоянного тока с энкодерами	да
	РОБИН PCC-1	3	1		
Kawasaki	RS03N	5	3	постоянного тока с энкодерами	нет
Commonplace Robotics	MOVER 4 HD	4	0,5	постоянного тока с энкодерами	да

Представляется разумным реализовать в учебной складской системе наиболее распространенные в промышленности компоновки, включающие в себя модули, представленные на рис. 3.



Рис. 3. Основные модули учебной автоматизированной складской системы

На основании выбранных модулей авторами были составлены две наиболее подходящие для реализации базовые комплектации стенда (рис. 4) с возможностью их объединения и расширения функционала за счет установки дополнительных модулей.

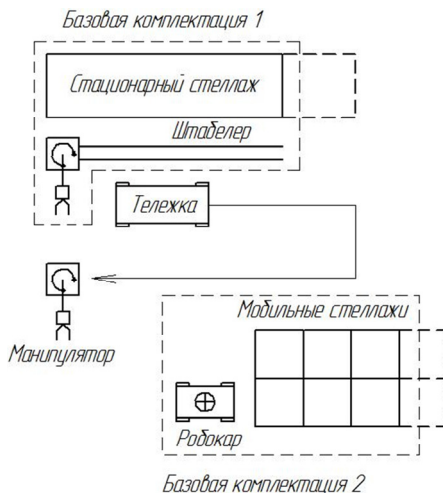


Рис. 4. Возможные комплектации стенда

В свете последних событий взятый государством курс на импортозамещение – необходимо рассмотреть возможность создания автоматизированной складской системы российского производства. Прежде всего для создания такой системы необходимо развитие производства компонентов, таких как специальные электродвигатели (серво- и шаговые), программируемые логические контроллеры (ПЛК), датчики, микроэлектронные компоненты.

Военно-промышленный комплекс России производит вышеназванные компоненты для оборонной сферы. Себестоимость таких компонентов весьма высока, к тому же они практически недоступны для применения в гражданской сфере. Исходя из этого, мы не будем рассматривать в статье возможность применения компонентов, производимых оборонными предприятиями.

В России отсутствуют производители специальных электродвигателей – важнейших компонентов, необходимых в современном машиностроении и роботостроении в частности. Пока что эти двигатели закупаются у иностранных производителей (HIVIN, Mavilor, Siemens). С производством ПЛК дела обстоят намного лучше – в России существует около 40 производителей ПЛК различного назначения (ОВЕН, РОБОКОН), не уступающих зарубежным аналогам.

Единственным производителем микроэлектроники в России на данный момент является завод МИКРОН (г. Зеленоград).

Автоматизированный склад состоит из следующих систем (рис. 5):

- силовая часть отвечает за движение робокаров, подъемников, манипуляторов и т. д. Включает в себя различные электродвигатели;
- приводная часть включает в себя различного типа направляющие, обеспечивающие движение в заданном направлении;
- система датчиков отвечает за навигацию. Одним из возможных вариантов сбора сигнала обратной связи может выступать система технического зрения. Применение системы технического зрения;
- система управления необходима для сбора информации с датчиков и пультов, а также управления исполнительными устройствами склада (силовой частью) в соответствии с определенным заданием. Включает в себя контроллер;
- система складирования выполняет функцию хранения (товара, складской единицы). Наиболее распространенной является система стеллажей.

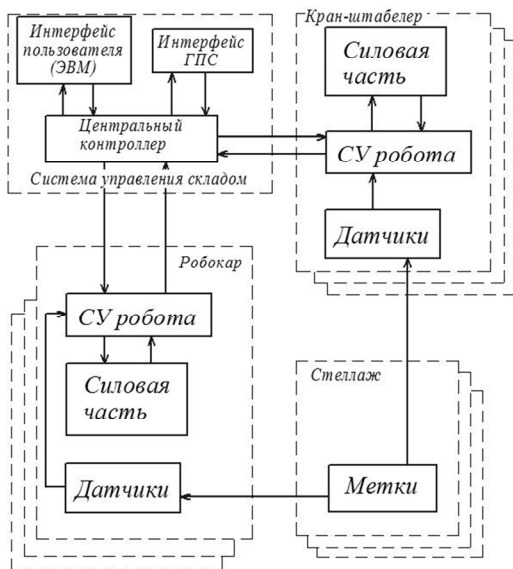


Рис. 5. Системы автоматизированного склада и принцип их взаимодействия

Анализ рынка компонентов показал, что существует возможность наладить производство автоматизированных складов, частично с применением компонентов производящихся на зарубежных предприятиях (Белоруссия, страны БРИКС).

В результате анализа конструкций, сфер применения, функций промышленных автоматизированных складских систем были выявлены наиболее распространенные компоновки. Изучение существующих учебных автоматизированных складских систем показало наличие у них некоторых функциональных недостатков. На основании анализа определены возможные компоновки учебной автоматизированной складской системы. Рассмотрена возможность создания такой системы на отечественной элементной базе. В результате обоснована целесообразность разработки отечественной учебной автоматизированной складской системы.

1. Автоматизированные склады [Электронный ресурс] // ООО «Новейшие Технологии ЛС» [Официальный сайт]. URL: <http://www.nt-ls.ru/katalog/spetsialnye/avtomatizirovannye-sklady> (дата обращения: 27.05.2015).

2. Где применяют автоматизированное оборудование KARDEX [Электронный ресурс] // АО «Компания инноваций и технологий» [Официальный сайт]. URL: <http://www.kiit.ru/press-center/statii/gde-primenyayut-avtomatizirovannoe-oborudovanie-kardex-dlya-xraneniya-i-skladirovaniya-statya-zhurnal-sklad-i-texnika/> (дата обращения: 25.05.2015).

3. Автоматизированные склады и складские системы [Электронный ресурс] // ООО «НижПромИнжиниринг» [Официальный сайт]. URL: <http://www.npi-company.ru/site.aspx?IID=2586452&SECTIONID=2586451> (дата обращения: 29.05.2015).

4. Смехов А. А. Автоматизированные склады. 4-е изд-е. М.: Машиностроение, 1987. 296 с.

5. Маликов О. Б., Малкович А. Р. Склады промышленных предприятий : справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 601 с.

6. ОВЕН: оборудование для автоматизации. [Официальный сайт]. URL: <http://www.owen.ru/> (дата обращения: 25.05.2015)

7. Журав А. А., Российский рынок промышленных датчиков [Электронный ресурс] // Новые химические технологии: аналитический портал [Интернет-портал]. URL: http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=1621 (дата обращения: 24.05.2015).

8. Группа компаний МИКРОН [Официальный Сайт]. URL: <http://www.mikron.ru/> (дата обращения: 26.05.2015).

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Е. И. Кац, А. М. Китаев

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Представлен новый подход к верификации программ для станков с ЧПУ, основанный на объединении дексельных моделей и BSP-деревьев. Предлагается сохранять по BSP дереву для каждого декселя, чтобы обеспечить точное нахождение острых ребер. Были проведены эксперименты для определения подходящих значений параметров и подтверждения преимуществ предлагаемого подхода.

A new approach for CNC verification based on the integration of dixel and BSP tree modeling techniques is presented. It is proposed to save a BSP tree in each dixel to ensure exact edge determination. Experiments were made to find appropriate parameters and to prove new method advantages.

Введение

Моделирование процесса обработки детали на металлообрабатывающем (фрезерном, токарном, электроэрозионном) станке с числовым программным управлением (ЧПУ) является неотъемлемой частью процесса автоматизации подготовки производства. Решение этой задачи часто используется на этапе разработки управляющих программ и всегда необходимо на этапе контроля этих программ. В настоящей работе предлагается новый подход к решению этой задачи, отличающийся, прежде всего более высоким качеством окончательного результата.

Состояние вопроса

Наибольшее распространение в настоящее время получили алгоритмы моделирования обработки на станках с ЧПУ основанные на представлении объекта при помощи декселей [1, 2]. Эта модель может быть отнесена к классу моделей, основанных на разбиении пространства. Дексель представляет собой пересечение геометрического объекта с прямой. Дексельная модель состоит из набора декселей, соответствующих некоторому набору параллельных прямых, обычно построенных на регулярной прямоугольной сетке. Для устранения недостатков, присущих дексельной модели, была предложена тридексельная модель [3, 4]. Такая модель включает в себя три дексельных модели, построенных в трех разных, обычно ортогональных, направлениях.

К основным достоинствам тридексельной модели с точки зрения моделирования обработки можно отнести чрезвычайную простоту и эффективность выполнения булевых операций и возможность реализации параллельной обработки без какого-либо усложнения алгоритмов или структур данных. Последнее относится как к GPGPU вычислениям, так и к вычислениям на многоядерном процессоре общего назначения.

Основными недостатками этой модели для наших целей следует признать, во-первых, высокий расход памяти. Для представления детали размером $500 \times 500 \times 500$ мм с погрешностью 0,01 мм потребуется $3,75E+14$ декселей, а это уже петабайты данных. Это означает, что в реальных ситуациях мы вынуждены использовать погрешности, ощутимо большие, чем хотелось бы. Другими словами первый недостаток может быть сформулирован, как невозможность обеспечить требуемую точность представления объекта при разумных ограничениях на объем используемой памяти. Во-вторых, дексельная модель не позволяет сохранять информацию об участках поверхности, на которых нарушается гладкость (ребрах). Разработаны и широко используются методы, позволяющие в какой-то степени восстанавливать эту информацию, но принципиально этот недостаток неустраним.

BSP-дексельная модель

В настоящей работе предлагается альтернативный подход, свободный от перечисленных недостатков и сохраняющий, в значительной мере, отмеченные достоинства.

Исходная идея заключается в том, чтобы хранить в каждом декселе информацию, позволяющую аналитически точно представить небольшой участок поверхности в окрестности этого декселя, точнее, в прямоугольном параллелепипеде между этим декселем и тремя соседними. Назовем его ячейкой. Таким образом, сразу устраняется второй недостаток, т. к. информация о ребрах на поверхности не теряется. Наличие или отсутствие первого недостатка будет определяться тем насколько «небольшим» окажется участок поверхности, который удастся эффективно сохранять в одной ячейке.

Первый очевидный шаг в этом направлении – хранить в каждой вершине декселя информацию о нормали к поверхности [5]. В этом случае появляется возможность восстановить информацию о ребрах. Ясно, что такой способ является точным, только если в нужной нам области поверхность является плоской. В качестве развития этого подхода предлагается хранить в каждой ячейке BSP-дерево, полностью и однозначно описывающее форму многогранного тела внутри этой ячейки. Такую ячейку назовем BSP-декселем, а соответствующую модель – BSP-дексельной.

Рассмотрим предложенную структуру данных с точки зрения перечисленных выше достоинств и недостатков.

Простота и эффективность выполнения булевых операций. Булевы операции над BSP-деревьями принципиальной сложности не представляют. Их эффективность, конечно, уступает эффективности булевых операций с декселями, однако если удерживать размеры BSP-деревьев достаточно маленькими, то можно рассчитывать на конкурентоспособные результаты.

Возможность простого распараллеливания вычислений. Это достоинство сохраняется полностью.

Проблемы с потерей ребер на поверхности, как уже было упомянуто выше, полностью отсутствуют в BSP-дексельной модели. Наличие или отсутствие первого недостатка определяется размером ячейки, т. е. в конечном счете размером BSP-дерева.

На основании сказанного выше, можно сформулировать следующую гипотезу. Использование предлагаемого подхода может обеспечить существенно более высокое качество получаемой модели при тех же затратах времени на ее построение. Под качеством здесь понимается, в первую очередь наличие или отсутствие дефектов, связанных с потерей ребер на поверхности. Эта гипотеза нуждается в экспериментальной проверке, которая и была выполнена.

Экспериментальные исследования

Схема эксперимента построена следующим образом. На первом этапе определялось оптимальное значение размера ячейки, обеспечивающее максимальное быстродействие. После этого подбиралось значение разрешения для традиционной тридексельной модели, которое давало бы такое же быстродействие. В результате получались пары моделей для одних и тех же объектов, временные затраты на получение которых двумя сравниваемыми методами одинаковы. Эти пары сравнивались с точки зрения качества полученного результата.

Мы ограничимся рассмотрением так называемой 3+2X обработки. Смысл этого термина в том, что рабочие перемещения инструмента происходят в трех линейных координатах, а две поворотные координаты используются только для позиционирования инструмента и не принимают участия в резании.

Общая идея реализации заключается в том, чтобы разбить исходную программу на фрагменты, каждый из которых порождает заметаемую инструментом поверхность, свободную от самопересечений. Затем для каждого такого фрагмента и для каждой ячейки построить BSP-дерево и

применить стандартную булеву операцию вычитания, т. е. вычесть тело, заметаемое инструментом, из тела, соответствующего текущему состоянию заготовки.

В худшем случае фрагментом программы, для которого нужно будет построить отдельную модель заметаемого тела, будет один отрезок (кадр). На практике оказывается, что чаще всего такой фрагмент будет содержать один или несколько десятков кадров. Здесь важно отметить, что такой подход позволяет обрабатывать в качестве кадров программы не только отрезки, но и дуги окружностей. Это означает, что появляется возможность обрабатывать их аналитически точно, а не аппроксимировать набором отрезков, получая в ряде случаев аналитические решения для заметаемой поверхности. Простой пример. При движении цилиндрического инструмента по дуге окружности заметаемая поверхность состоит из порций цилиндрических поверхностей и плоскостей. Конечно, на следующем этапе, т. е. при построении модели в виде BSP-дерева, эти поверхности все равно будут аппроксимированы многогранниками, но существует возможность сохранить в BSP-дереве информацию об исходной аналитической поверхности и использовать ее в дальнейшем при визуализации и некоторых вычислениях.

Для экспериментов использовался компьютер с процессором Intel Core i7-2700K 3.50GHz с ОЗУ 8 ГБ. ОС – Windows 7x64. Программы реализованы на Visual Studio 13 C++. Исследовалась 64-разрядная версия.

Реализация булевых операций над BSP деревьями выполнена на основании алгоритма, предложенного в работе [4]. Базой для сравнения являлась реализация алгоритма восстановления поверхности по тридексельной модели, содержащей нормали к поверхности в вершине каждого декселя [6], т. к. она обеспечивает наиболее качественный результат. Если использовать алгоритмы, работающие без учета нормалей, то разница в качестве будет гораздо более существенной. В сравнении участвовали однопоточные реализации, т. к. возможность распараллеливания для обоих методов не вызывает сомнений.

Для исследования были выбраны 3 детали (рис. 1, 2, 3). Программы для обработки этих деталей содержат 3361, 161322 и 3923 кадров соответственно.

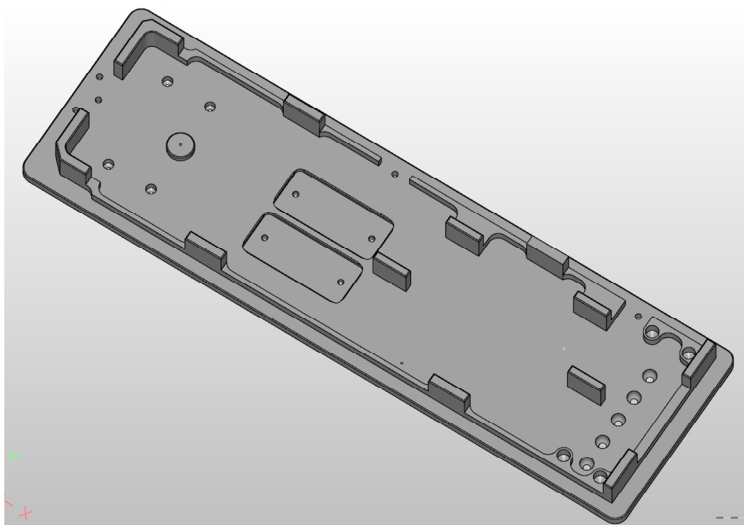


Рис. 1. Модель детали 1

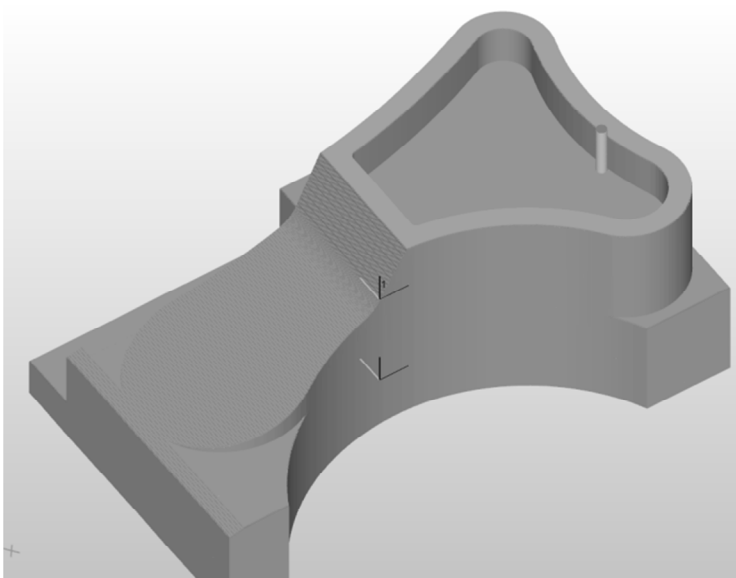


Рис. 2. Модель детали 2

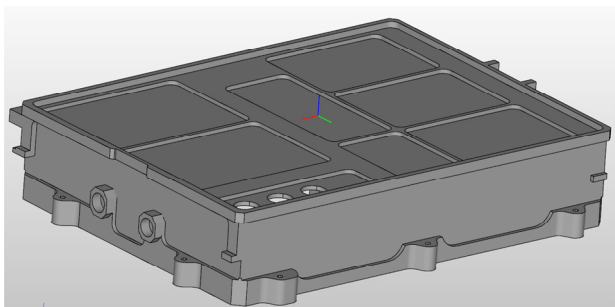


Рис. 3. Модель детали 3

Результаты первого этапа приведены в табл. 1. Для каждой детали указано время в секундах, затрачиваемое на построение модели, в зависимости от количества BSP-декселей в этой модели. Наилучшие результаты получаются для значений 1024 или 4096.

Таблица 1

Время построения модели, с.				
	Количество BSP декселей, шт.			
	256	1024	4096	16384
№ детали	Время построения модели, с.			
3	34	18	7,7	8.6
1	4,1	2,2	4,2	7,1
2	57	35	45	66

Для того чтобы обеспечить такое же время обработки для три-дексельной модели количество декселей пришлось взять 400 000, 6 000 000 и 800 000 для деталей 1, 2, 3 соответственно.

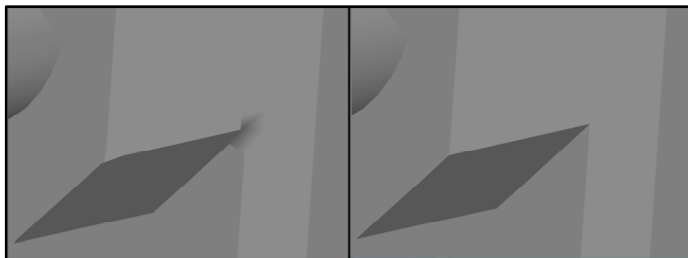


Рис. 4. Фрагмент модели детали 1

На рис. 4, 5, 6 приведены увеличенные изображения фрагментов деталей выделенных рамкой на рис. 1, 2, 3. Слева – изображение тридексельной модели, а справа – BSP-дексельной.

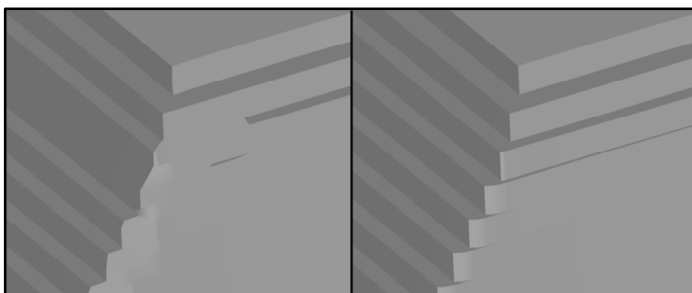


Рис. 5. Фрагмент модели детали 2

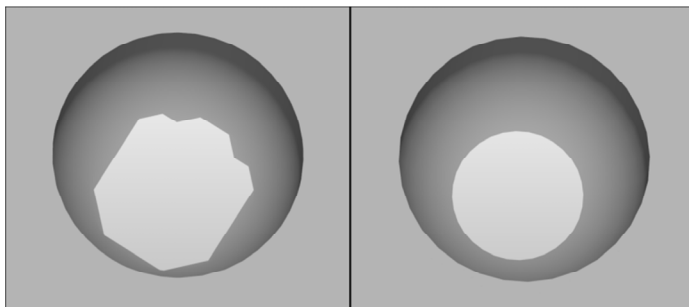


Рис. 6. Фрагмент модели детали 3

Отчетливо видно, что правая модель воспроизводит мелкие элементы значительно лучше. Можно отметить, что даже если при обработке детали 1 взять в 20 раз более густую сетку декселей (8 000 000 штук), то получим лишь некоторое улучшение (рис. 7), при этом время обработки увеличится до 46 с.

Заключение

Была высказана и экспериментально подтверждена гипотеза о возможности существенного улучшения качества построения геометрической модели детали, получаемой обработкой на станке с ЧПУ, без увеличения временных затрат на такое построение. Улучшение достигнуто за счет объединения преимуществ дексельного и BSP-представлений. Дополнительным преимуществом предлагаемого метода является возможность качественного моделирования проволоочной электроэрозион-

ной обработки, которая вызывает большие затруднения при традиционном подходе.

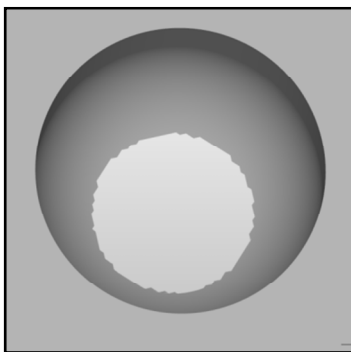


Рис. 7. Фрагмент улучшенной модели детали 3

Следующим этапом работы должно стать распространение полученных результатов на полноценную пятикоординатную обработку.

-
1. *Huang Y., Oliver J. H.* Integrated simulation, error assessment, and tool path correction for five axis NC machining *J. Manufact Syst*, 14(5). 1995. 331–334.
 2. *Van Hook. T.* Real-time shaded NC milling display // *Proceedings of ACM Siggraph*. 1986. 15–20.
 3. *Muller H., Surmann T., Stautner M., Albersmann F., Weinert K.*: Online sculpting and visualization of multi-dexel volumes. In *Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications (SM '03)*. ACM, New York, NY, USA, 2003. P. 258–261.
 4. *Benouamer M. O., Michelucci D.*: Bridging the gap between CSG and Brep via a triple ray representation // *ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, proceedings of the 4th ACM symposium on Solid modeling and applications, Atlanta, GA, 1997. 68–79.
 5. *Ren Y., Zhu W., Lee Y-H.* Feature Conservation Conversion of Tri-dexel Volume Models to Polyhedral Surface Models for Product Prototyping // *Computer-Aided Design and Application*. Vol. 5(6). 2008. P. 932–941.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ОДНОКОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

А. П. Комиссаров¹, Ю.А. Лагунова², О.А. Лукашук¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

Показано, что с ростом вместимости ковша и массы экскаватора удельные показатели функционирования экскаватора практически остаются на одном уровне, соответствующем уровню энергопотребления (энерговооруженности) для каждого типа экскаватора (электромеханического или гидравлического), зависящему от вида рабочего оборудования, соотношения между линейными и весовыми параметрами и других факторов. Предложена компоновочная схема рабочего оборудования с внутренним замыканием рабочих нагрузок в пределах рабочего органа, включающая рабочий орган в виде двух оппозитно расположенных ковшей и механизм замыкания. Предложен показатель энергоэффективности одноковшовых экскаваторов.

It is shown, that with growth of capacity and weight of excavators their specific indicators of functioning remain practically at the same level corresponding to the energy consumption value (their available power) for excavators of each type (electromechanical or hydraulic), with this value depending on the type of their work equipment, on the ratio between their linear and weight parameters and on other factors. The layout diagram of the working equipment with the inner closure of workloads within its work member is suggested. It includes the work member in the form of two oppositely arranged buckets and the closure mechanism. The power efficiency index for single-bucket excavators is proposed.

Введение

Основным направлением развития производительных сил является создание высокопроизводительных и ресурсосберегающих машин – машин нового поколения.

Технический уровень одноковшовых экскаваторов характеризуется удельными (отнесенными к массе машины) значениями главных показателей – установленной мощности приводных двигателей и вместимости ковша.

Как показывает практика проектирования и эксплуатации одноковшовых экскаваторов, с ростом производительности и массы машин

удельные (отнесенные к массе экскаватора) показатели и в целом эффективность рабочего процесса практически остаются на одном уровне.

Данное обстоятельство обуславливается особенностью силовой схемы (схемы восприятия и замыкания внешних нагрузок) одноковшовых экскаваторов. В традиционных конструкциях экскаваторов рабочая нагрузка (сила сопротивления породы копанию), концевая нагрузка (сила тяжести груженого ковша) и силы тяжести элементов рабочего оборудования воспринимаются металлоконструкцией машины, далее нагрузки передаются на ходовое оборудование и замыкаются реакцией грунта. При этом действующий на экскаватор суммарный момент опрокидывающих сил уравнивается суммарным моментом удерживающих сил (сил тяжести поворотной платформы, противовеса и ходового оборудования).

В результате при существующей силовой схеме концевая нагрузка, вместимость ковша и установленная мощность приводных двигателей определяется в зависимости от массы экскаватора.

Постановка задачи

Кардинальное решение проблемы повышения технического уровня одноковшовых экскаваторов может быть достигнуто за счет изменения силовой схемы машины.

Известно, что силовая схема является рациональной, если внешние нагрузки замыкаются на коротком участке элементами, работающими предпочтительно на растяжение или сжатие [1].

Цель работы – повышение эффективности функционирования экскаватора.

Поставленная цель достигается за счет разработки рабочего оборудования с рациональной схемой, обеспечивающей замыкание рабочей нагрузки.

В этом случае при исключении воздействия на экскаватор опрокидывающего момента рабочей нагрузки увеличивается концевая нагрузка (вместимость ковша) и, соответственно, производительность при неизменной массе экскаватора.

Основные задачи работы:

- обоснование схемы рабочего оборудования с замыканием рабочей нагрузки;
- определение главных показателей экскаватора с рациональной силовой схемой и оценка уровня энергопотребления экскаватора.

Результаты

В работе выполнена оценка технического уровня электромеханических (мехлопат) и гидравлических экскаваторов на основе сравнения удельных значений главных показателей.

В табл. 1 приведены технические характеристики экскаваторов.

Определены удельные значения вместимости ковша e , установленной мощности приводных двигателей p и показатель устойчивости $\Pi_{уст}$:

$$e = \frac{E}{M}; \quad p = \frac{P_{уст}}{M}; \quad \Pi_{уст} = \frac{M}{ER_{кmax}},$$

где E – вместимость ковша; M – масса экскаватора; $P_{уст}$ – установленная мощность приводных двигателей; $R_{кmax}$ – максимальный радиус копания.

Удельные значения вместимости ковша составляют:

– для мехлопат отечественного производства

$$e_m = 0,018 \dots 0,022 \text{ м}^3/\text{т};$$

– для гидравлических экскаваторов (за исключением ЭГ-20)

$$e_{ЭГ} = 0,050 \dots 0,063 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Удельные значения установленной мощности приводных двигателей составляют:

– для мехлопат

$$P_m = 1,86 \dots 2,20 \text{ кВт/т};$$

– для гидравлических экскаваторов (за исключением ЭГ-20)

$$P_{ЭГ} = 3,63 \dots 4,53 \text{ кВт/т}.$$

Показатели устойчивости составляют:

– для мехлопат отечественного производства

$$\Pi_{уст.м} = 1,86 \dots 2,09;$$

– для гидравлических экскаваторов

$$\Pi_{уст.ЭГ} = 0,89 \dots 2,02.$$

Адекватность выполненной оценки технического уровня подтверждается незначительным разбросом значений удельных показателей экскаваторов производства одного предприятия (фирмы).

В целом значения удельных показателей гидравлических экскаваторов существенно превышают (в 2–3 раза) значения показателей мехлопат, а показатели устойчивости значительно меньше показателей устойчивости мехлопат.

Таблица 1

Технические характеристики мехлопат и гидравлических экскаваторов [2, 3]

Показатели	Мехлопаты				Гидравлические экскаваторы				
	(1)	(1)	(2)	(3)	(3)	(1)	(2)	(4)	(5)
ЭЖГ-12	ЭЖГ-20	ЭЖГ-15	2300ХРС	2800ХРС	ЭГ-20	ЭГ-110	РС1250	РС2000	Р995
Вместимость ковша, м ³	12	20	15	25,5	35,7	20	5,5	11	28
Максимальный радиус копания, м	21	23,4	22,6	21,3	24,2	19	9,9	13,2	17,8
Усилие на подвеске ковша (внедрения), кН	1225	2000	1470			(2000)	(390)		
Концевая нагрузка, кН				907	1180				
Мощность приводных двигателей, кВт	1250	2250	1250	2000	2500	1260	450	485	728
Рабочая масса, т	655	1075	672	911	1310	570	110	107	195
Показатель устойчивости	2,60	2,30	1,98	1,68 (0,047)*	1,52 (0,046)	1,50	2,02	1,88	1,34
Удельная мощность приводных двигателей	1,91	2,09	1,86	2,20	1,91	2,21	4,09	4,53	3,73
Удельная вместимость ковша	0,018	0,019	0,022	0,028	0,027	0,035	0,050	0,061	0,063
									0,053

Примечание: * – показатель устойчивости определен по концевой нагрузке.

Производство: 1 – ОАО «Уралмашзавод»; 2 – ООО «ИЗ-КАРТЭКС»; 3 – P&H Mining Equipment (США); 4 – KOMATSU (Япония); 5 – LIEBHERR (Германия).

Рост удельных показателей гидравлических экскаваторов обуславливается возможностью реализации различных рабочих режимов – копания и внедрения ковша в развал породы ввиду высокой кинематической подвижности рабочего оборудования.

При внедрении ковша в развал породы по практически горизонтальной траектории исключается опрокидывающий момент рабочей нагрузки и, соответственно, уменьшается величина суммарного момента удерживающих сил, т. е. массы экскаватора.

Максимальное значение вместимости ковша и концевой нагрузки в данном случае определяется из условия устойчивости экскаватора при транспортировании груженого ковша.

Условие устойчивости экскаватора в этом случае запишется следующим образом:

$$M_{\text{удерж}} = M_{\text{опр}} k_{\text{уст}} = (G_{\text{об}} R_{\text{об}} + G_{\text{к+п}} R_{\text{к}}) k_{\text{уст}},$$

где $M_{\text{удерж}}$ и $M_{\text{опр}}$ – суммарные моменты удерживающих и опрокидывающих сил; $G_{\text{об}}$ – сила тяжести элементов рабочего оборудования (без ковша); $G_{\text{к+п}}$ – концевая нагрузка; $R_{\text{об}}$, $R_{\text{к}}$ – плечи сил; $k_{\text{уст}}$ – коэффициент устойчивости.

При этом величина рабочей нагрузки (усилие внедрения $F_{\text{вн}}$), определяемая из условия сцепления ходового движителя (гусениц) с грунтом, значительно возрастает и составляет $F_{\text{вн}} = (0,3 \dots 0,5)G$, где G – сила тяжести экскаватора.

Рост рабочей нагрузки при внедрении ковша, вызванный в основном увеличением энергоемкости экскавации породы при внедрении (продавливании) ковша в развал породы, определяет значительное увеличение потребляемой мощности. При этом повышается нагруженность и масса рабочего оборудования.

Таким образом, при работе в режиме внедрения ковша в развал породы за счет форсирования рабочей нагрузки обеспечивается существенное увеличение вместимости ковша и снижение металлоемкости экскаватора. Одновременно значительно увеличиваются энергозатраты и установленная мощность приводных двигателей. Кроме того, реализация режима внедрения ковша в развал породы требует качественной подготовки (рыхления) породы.

В целом основным рабочим режимом гидравлического экскаватора при отработке забоя в границах рабочей зоны является режим копания.

При отработке забоя как в режиме внедрения ковша, так и при копании средневзвешенное значение потребляемой мощности практически будет равно потребляемой мощности в режиме копания и, следовательно, рациональное значение удельной мощности приводных двигателей гидравлического экскаватора из условия полного использования уста-

новленной мощности следует принимать равным значению удельной мощности приводных двигателей для мехлопат (как в экскаваторах ЭКГ-20 и ЭГ-20).

Таким образом, рациональный уровень энергопотребления одноковшовых экскаваторов, величина которого равна удельному значению установленной мощности приводных двигателей мехлопат, составляет

$$\dot{E}_{\text{ОЭ}} = 1,86 \dots 2,20 \text{ кВт/т.}$$

Таким образом, повышение технического уровня гидравлических экскаваторов, заключающееся в существенном росте удельной вместимости ковша (в 2,5–3 раза) и, соответственно, снижении металлоемкости машины, обеспечивается за счет исключения опрокидывающего момента рабочей нагрузки и уменьшения при этом момента удерживающих сил. Однако в этом случае повышается уровень энергопотребления (в 2–2,5 раза), а также нагруженность и масса рабочего оборудования.

На кафедре горных машин и комплексов УГГУ разработана схема рабочего оборудования гидравлического экскаватора с замыканием рабочей нагрузки в пределах рабочего органа [4], что позволит исключить опрокидывающий момент рабочей нагрузки. Рабочее оборудование включает рабочий орган в виде двух оппозитно расположенных ковшей и механизм замыкания. На рис. 1 приведена схема рабочего органа. Основным элементом рабочего оборудования является механизм замыкания, обеспечивающий выполнение следующих функций – экскавацию горной породы, заполнение рабочего органа и разгрузку.

Замена существующих средств выполнения указанных функций в базовых схемах рабочего оборудования (гидроцилиндров поворота стрелы, поворота рукояти и поворота ковша) механизмом замыкания позволит существенно повысить эффективность использования установленной мощности силового оборудования, а также повысить качество управления рабочим процессом.

При замыкании ковшей сила сопротивления копанию рабочим органом равна силе сопротивления копанию отдельного ковша, т. е. уменьшается в два раза относительная (отнесенная к вместимости рабочего органа) сила сопротивления копанию и, соответственно, уменьшается нагруженность и масса рабочего органа. В конечном счете энергоемкость процесса экскавации также уменьшится в два раза.

Рабочее оборудование с замыканием рабочей нагрузки позволит реализовать принципиально новый способ экскавации, заключающийся в захвате горной массы при замыкании ковшей как выше, так и ниже уровня стояния. Работоспособность предложенной схемы рабочего оборудования подтверждена стендовыми испытаниями.

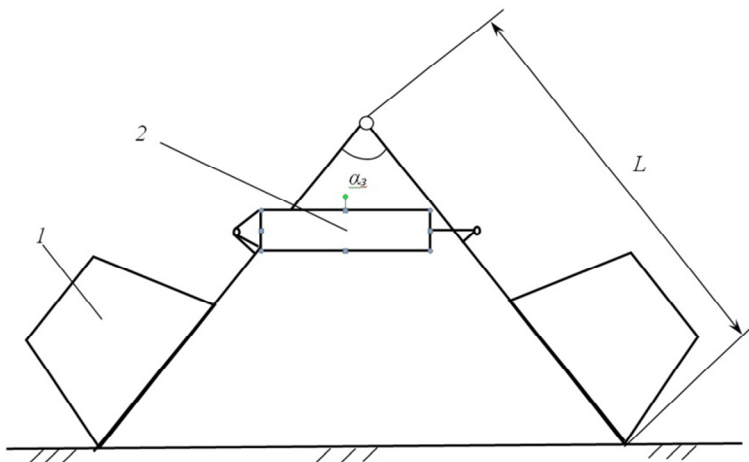


Рис. 1. Схема рабочего органа с замыканием нагрузок
1 – ковш; 2 – гидроцилиндр замыкания

Максимальное значение вместимости рабочего органа определяется из условия устойчивости экскаватора при транспортировании груженого ковша (как и вместимость ковша гидравлического экскаватора в режиме внедрения в развал породы) и соответственно составит

$$E_{3\max} = e_{\exists} \Gamma M.$$

Получены аналитические зависимости для определения основных параметров экскаватора с замыканием рабочей нагрузки.

Вместимость рабочего органа определяется объемом горной массы V , захватываемой при замыкании ковшей, составит

$$E_3 = VK_3^{-1},$$

где $V = SB_K$; $K_3 = K_H / K_P$; $S = 0,5L^2 (\alpha_3 - \sin \alpha_3)$ – площадь кругового сегмента; L – длина плеча ковша; α_3 – угол замыкания; B_K – ширина ковша; K_3 – коэффициент экскавации; K_H – коэффициент наполнения рабочего органа; K_P – коэффициент разрыхления породы в ковше.

Мощность приводных двигателей определяется по следующей зависимости

$$P_{\text{уст}} = E_{3\max} a_3 t_3^{-1},$$

где a_3 – энергоемкость рабочего процесса при замыкании ковшей; t_3 – длительность замыкания.

Энергоемкость рабочего процесса при замыкании ковшей равна [5]

$$a_3 = K_1 \left[\alpha_3 + 2 \cos \frac{\alpha_3}{2} \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \alpha_3}{4} \right) \right] (\alpha_3 - \sin \alpha_3)^{-1},$$

где K_1 – коэффициент сопротивления породы копанью.

При углах замыкания $\alpha_3 = 90 - 120^\circ$ $a_3 = (0,57 \dots 0,63) K_1$.

Длительность замыкания составит

$$t_3 = 0,5 L \alpha_3 V_3^{-1},$$

где L – длина плеча ковша; V_3 – скорость замыкания.

Выполнен расчет главных показателей экскаватора ЭГЗ с замыканием рабочей нагрузки в пределах рабочего органа при исходных данных, соответствующих параметрам экскаватора Р995.

Принято $E_3 = 28 \text{ м}^3$; $M = 441 \text{ т}$; $\alpha_3 = 90^\circ$; $B_k = 1,4 \sqrt{0,5 E_3} = 3,4 \text{ м}$; $V_3 = 0,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; $K_H = 1$; $K_p = 1,35$; $K_1 = 325 \text{ кПа}$; $e_{\text{ЭГ}} = 0,063 \text{ м}^3/\text{т}$; $a_3 = 0,57 K_1$.

Результаты расчета параметров экскаватора ЭГЗ

Объем горной массы, захватываемой при замыкании ковшей, равен

$$V = E_3 K_3 = 28 \cdot \frac{1}{1,35} = 20,7 \text{ м}^3.$$

Длина плеча ковша составит

$$L = \sqrt{\frac{2V}{B_k(\alpha_3 - \sin \alpha_3)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20,7}{3,4 \cdot (1,57 - 1)}} = 4,6 \text{ м}.$$

Длительность замыкания равна

$$t_3 = 0,5 L \alpha_3 V_3^{-1} = 0,5 \cdot 4,6 \cdot \frac{1,57}{0,5} = 7,2 \text{ с}.$$

Установленная мощность приводных двигателей составит

$$P_{\text{уст.з}} = E_3 a_3 t_3^{-1} = 28 \cdot 0,57 \cdot 325 \cdot 7,2^{-1} = 720 \text{ кВт}.$$

Удельная мощность приводных двигателей равна

$$P_3 = \frac{P_{\text{уст.з}}}{M_3} = \frac{720}{441} = 1,63 \text{ кВт/т}.$$

Выполнена оценка технического уровня различных типов экскаваторов – мехлопат и гидравлических экскаваторов с рабочим оборудованием традиционного исполнения и с замыканием рабочей нагрузки (табл. 2).

Для оценки уровня энергопотребления экскаватора предложен показатель энергоэффективности

$$\Pi_{\text{ЭЭ}} = \frac{E}{P_{\text{уст}}}$$

Показатель энергоэффективности характеризует уровень производительности экскаватора при определенной величине энергозатрат.

Таблица 2

Технические характеристики (и расчетные данные) мехлопаты, гидравлического экскаватора и экскаватора с замыканием рабочей нагрузки

Показатели	2300XPC	R995	ЭГЗ
Вместимость основного ковша, м ³	25,5	28	28
Мощность приводных двигателей, кВт	2000	1600	720
Рабочая масса, т	911	441	441
Удельная мощность приводных двигателей	2,20	3,63	1,63
Удельная вместимость ковша (рабочего органа)	0,028	0,063	0,063
Показатель энергоэффективности, м ³ /кВт	0,013	0,018	0,039

Как видно, экскаватор ЭГЗ с замыканием рабочей нагрузки отличается максимальной величиной показателя энергоэффективности, т. е. обеспечивается более эффективное использование энергоресурсов.

Заключение

Установлены уровни энергопотребления различных типов одноковшовых экскаваторов – электромеханических (мехлопат) и гидравлических экскаваторов.

Показано, что уровень энергопотребления зависит от вида силовой схемы экскаватора.

Обоснована рациональная силовая схема экскаватора и разработано техническое решение рабочего оборудования с замыканием рабочей нагрузки.

Применение рабочего оборудования с замыканием рабочей нагрузки позволит существенно снизить уровень энергопотребления и повысить энергоэффективность одноковшовых экскаваторов.

1. Орлов П. И. Основы конструирования. М.: Машиностроение, 1977. Кн. 1. 340 с.

2. Горная техника : каталог-справочник. 2014. Вып. № 2 (14).

3. *Подэрни Р. Ю.* Механическое оборудование карьеров. М.: Изд-во МГГУ, 2007. 680 с.

4. Рабочее оборудование экскаватора: патент на полезную модель № 92033. Оpubл. 10.03.2010. Бюл. № 7.

5. *Иванов И. Ю., Комиссаров А. П.* Оценка энергоемкости рабочего процесса гидравлического экскаватора с замыканием рабочих нагрузок // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 9. С. 45–47.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ КОРРЕКЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ РЕЗЦА

С. С. Кугаевский, Д. С. Сивков
Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В статье рассматривают вопросы повышения точности токарной обработки нежестких деталей методом корректировки траектории движения резца.

The article deals with matters improve the accuracy of turning non-rigid parts by adjusting the path of a cutter.

Обработка резанием нежестких заготовок на металлорежущих станках всегда связана с частичной потерей точности выполняемых размеров. Проблема заключается в том, что в результате упругих отжятий заготовки под действием силы резания полученная цилиндрическая поверхность имеет бочкообразную форму.

Величина бочкообразности зависит от силы резания, длины и сечения заготовки. По данным можно рассчитать величину упругих отжятий для различных схем закрепления заготовки (рис. 1) [1].

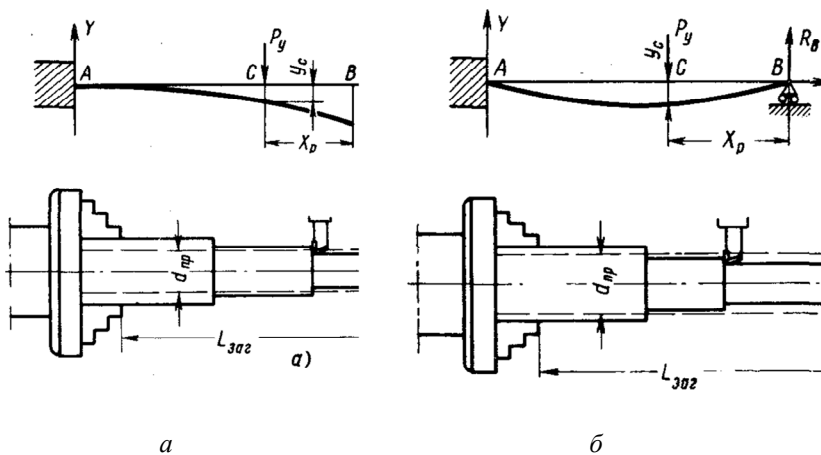


Рис. 1. Расчетная схема и формула определения упругих отжятий для условий консольного закрепления заготовки (а) и закрепления в патроне с поджимом задним центром (б)

Формула для расчета упругих отжятий по схеме (рис. 1, а):

$$y_c = \frac{P_y (L_{заг} - x_p)^2}{3 \cdot 10^3 \cdot EJ}. \quad (1)$$

Формула для расчета упругих отжятий по схеме (рис. 1, б):

$$y_c = \frac{P_y}{12EJ} \left\{ \frac{x_p^2 (L_{заг} - x_p)^3 \cdot (3 \cdot L_{заг} - x_p)}{L_{заг}^3} \right\}, \quad (2)$$

где Y_c – величина упругих отжятий (мм);

P_y – радиальная составляющая силы резания (н);

$L_{заг}$ – общая длина заготовки (мм);

X_p – позиция резца (от правого торца) в месте определения величины упругих отжятий;

E – модуль упругости обрабатываемого материала н/мм²;

J – момент инерции сечения заготовки мм⁴;

В случае нежестких заготовок величина упругих отжятий может достигать значений, сравнимых с полем допуска на диаметральный размер.

Наиболее распространенным методом борьбы с упругими отжатиями является применение подвижных и неподвижных люнетов. Однако установка люнетов сопряжена с загромождением зоны резания и не всегда позволяет достичь результата, особенно когда необходимо проточить длинный гладкий валик без переустановов. Подобные проблемы возникают при обработке длинных резьбовых поверхностей, изготовлении протяжек и т. д.

Известны также решения, в которых с целью повышения точности обработки за счет компенсации упругих деформаций обрабатываемой детали в месте приложения силы резания, к торцу детали прикладывают опорный момент, величину которого измеряют в зависимости от положения режущего инструмента при его перемещении вдоль оси детали [2].

Другим направлением решения задачи может стать предварительное моделирование процесса обработки и внесение поправок в управляющую программу (УП) станка с ЧПУ.

Рассмотрим два таких метода:

1. Внесение корректировки траектории движения резца;
2. Регулирование величины осевой подачи рабочего хода.

В первом случае необходимо предварительно рассчитать ожидаемое упругое отжатие заготовки и внести соответствующие корректировки в значения промежуточных точек траектории, заданной в УП.

Во втором случае ставится задача управления величиной силы резания за счет изменения осевой подачи инструмента.

В обоих случаях траектория движения резца разбивается на множество отдельных отрезков, в которых по заданному закону изменяется соответствующий параметр УП (диаметральная координата X или величина подачи F).

С целью опробования перечисленных методов проведена серия экспериментов. Расчетная схема представлена на рис. 2.

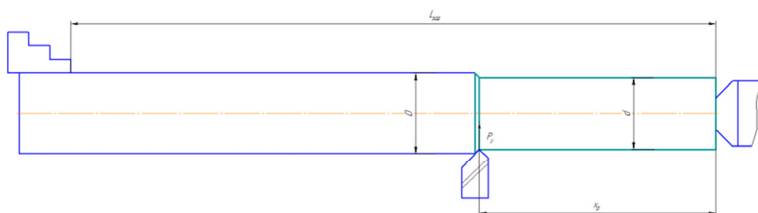


Рис. 2. Расчетная схема

В качестве примера принята обработка гладкого валика $d=12$ мм и $L_{\text{заг}} = 200$ мм. Материал заготовки – сталь 40, D заготовки = 14 мм. Метод закрепления – в патроне с поджимом задним центром.

Выбранные режимы резания:

Глубина резания $t = 1$ мм. Осевая подача $F = 0,2$ мм/об.

Расчет силы резания производим по формуле:

$$P_y = 9,81 \cdot C_{P_y} \cdot t^{X_y} \cdot S^{Y_y} \cdot V^{n_y} \cdot K_p, \quad (3)$$

где C_{P_y} – постоянный коэффициент;

X_y, Y_y, n_y – показатели степени, величина которых принимается по справочникам;

$$K_p = K_{Mp} \cdot K_{\phi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{rp},$$

где K_{Mp} – учитывает механические свойства обрабатываемого материала;

$K_{\phi p}, K_{\gamma p}, K_{\gamma p}, K_{rp}$ – учитывают влияние геометрических параметров резца.

Величины коэффициентов и показателей степеней примем по справочнику [3].

Для выбранных режимов резания сила резания составит $P_y \approx 300$ н.

Расчет величины упругих отжатий, проведенный по формуле (2), показывает что величина упругих отжатий в месте максимального прогиба составляет $Y_c \approx 0,08$ мм. В пересчете на диаметр погрешность составляет 0,16 мм, что сравнимо с полем допуска по 12 качеству (для $\varnothing 12h12$ допуск составляет 0,18 мм).

Проверка предполагаемых упругих отжатий моделированием в САЕ-системе SolidWorksSimulation дала примерно сравнимые результаты (рис. 3).

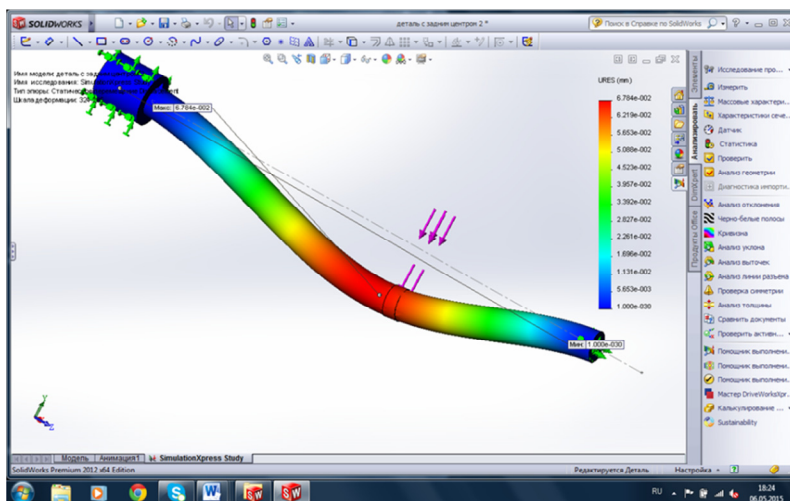


Рис. 3. Моделирование упругих отжатий в среде SolidWorksSimulation

По данным этого исследования величина упругих отжатий составляет:
 $Y_c = 0,068$ мм.

На основании полученных данных рассчитаем УП для станка с ЧПУ в 3 вариантах:

1). Обработка цилиндрической поверхности ($L = 200$ мм, $\varnothing = 12$ мм) с подачей $S = 0,2$ мм/об одним кадром в осевом направлении; $t = 1$ мм; $n = 2000$ об/мин.

2). Обработка той же поверхности с плавным искажением траектории в направлении упругих отжатий при постоянной подаче $S = 0,2$ мм/об; $n = 2000$ об/мин; $t = 1$ мм.

3). Обработка той же поверхности за несколько осевых перемещений с изменением подачи пропорционально упругим отжатиям; $t = 1$ мм; $n = 2000$ об/мин.

Эксперимент проводился на базе Центра обработки материалов УрФУ. Первоначально с помощью стрелочного индикатора на станке ИТВМ250 была проверена гипотеза о наличии упругих отжатий при обработке нежестких валов (рис. 4).

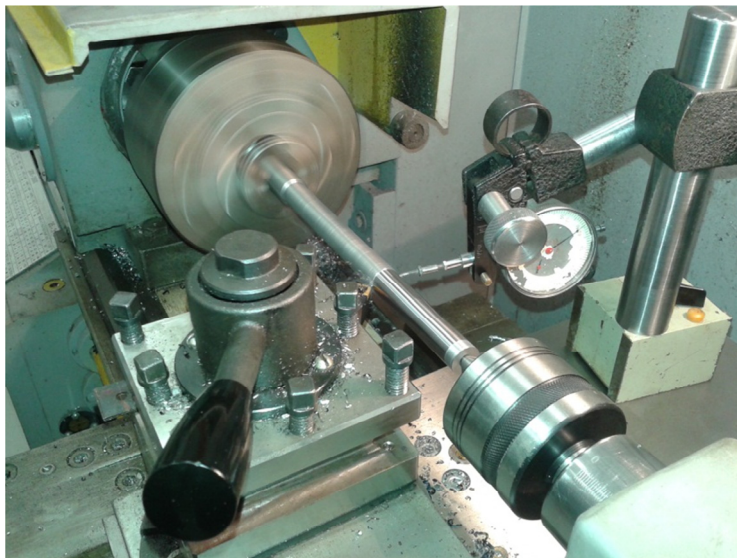


Рис. 4. Проверка наличия упругих отжатий заготовки

Затем эксперимент производился на станке с ЧПУ мод. СТХ310 esoline. Разработка управляющей программы в формате Siemens 840D выполнялась по результатам расчета ожидаемых отклонений оси заготовки. Обработка производилась токарным резцом с сечением державки 20х20 мм при небольшом вылете, поэтому влиянием жесткости системы станок – приспособление – инструмент можно пренебречь. Фотография хода эксперимента показана на рис. 5.

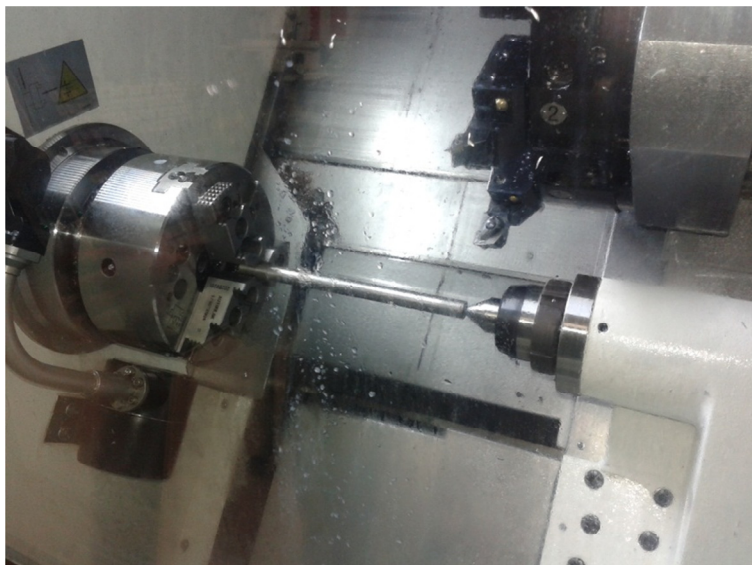


Рис. 5. Обработка заготовки с коррекцией траектории реза на станке мод. CTX310 ecoline

Результаты эксперимента показаны в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение результатов эксперимента

Номер эксперимента	Максимальный отгиб Y_c (мм)	Погрешность на диаметр Δ (мм)	Осевая координата Z, соответствующая максимальному отгибу (мм)	Величина погрешности в % от традиционной схемы обработки
Расчетные значения	0,08	0,16	75	
Эксперимент № 1	0,165	0,31	80	100
Эксперимент № 2	0,035	0,07	Равномерно по длине	22,5
Эксперимент №3	0,065	0,13	100	42

Превышение фактической величины упругих отжатий над расчетными следует отнести к влиянию резонансных явлений при обработке. В то же время проведенный эксперимент доказывает актуальность применения данного метода.

Выводы

1. Точение с коррекцией траектории (эксперимент № 2) обеспечило наиболее правильную цилиндрическую форму детали. Отклонение диаметра составило $\Delta = 0,07$ мм. Равномерное распределение погрешности по длине заготовки говорит о том, что ожидаемая бочкообразность скомпенсирована управляющей программой. Сокращение погрешностей существенное (более чем в 4 раза). Однако на поверхности наблюдается ухудшение шероховатости (появление рисок и следов от инструмента).

2. Точение с регулируемой подачей (эксперимент № 3) также дало улучшение точности в 2,5 раза при некотором увеличении машинного времени. Качество поверхности схожее, как при точении с коррекцией траектории.

3. Предложенные алгоритмы обработки нежестких заготовок могут лечь в основу разработки станочных циклов с параметрически заданными значениями входных параметров, что позволит обеспечить повышение точности обработки деталей на станках с ЧПУ.

1. Горанский Г. К., Владимиров Е. В., Ламбин Л. Н. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение, 1970. 222 с.

2. Мозолева Т. В., Бохонский А. И., Ямпольский Л. С. Способ обработки нежестких деталей : патент SU 973240), 1982.

3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 2 / А. М. Дальский, А. Г. Сулов, А. Г. Косилова и др. ; под ред. А. М. Дальского и др. 5-е изд.-е., испр. М.: Машиностроение : Машиностроение-1, 2003. 944 с.

МЕТОД НАСТРОЙКИ НУЛЕВОЙ ТОЧКИ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ ОПЕРАЦИИ

С. С. Кугаевский, А. Н. Станиславчук

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В статье рассматриваются вопросы настройки «нулевой точки» программы для фрезерного станка с ЧПУ. Предложен метод настройки «нулевой точки» вне станка. Этот метод позволяет сократить время настройки и уменьшить затраты на технологическую оснастку.

In the article the questions of installation "zero point" program for CNC milling machine are considered. The method of installation "zero point" outside of the machine is offered. This method allows to reduce setup time and the cost of tooling.

Наиболее эффективным оборудованием современного машиностроительного производства являются станки с ЧПУ. Стоимость станкочаса современных станков с ЧПУ составляет более одной тысячи рублей, поэтому задача сокращения времени настройки является актуальной. Процесс наладки станка с ЧПУ на программную операцию включает две обязательные задачи:

- **Измерение параметров инструмента** $L_1, L_2, \dots L_n$ (вылет) и $D_1, D_2, \dots D_n$ (диаметр) и ввод этих значений в соответствующие ячейки памяти устройства ЧПУ.
- **Определение положения нулевой точки детали** в координатах станка X_0, Y_0, Z_0 и ввод этих значений в соответствующие ячейки памяти устройства ЧПУ.

Для измерений параметров инструмента уже давно применяются специальные устройства для настройки инструментов вне станка.

Задача настройки нулевой точки заготовки решается двумя методами. Первый метод – это использование специальных приспособлений. После установки приспособления на стол станка наладчик методом касания определяет положение нулевой точки и вводит ее координаты в устройство ЧПУ. Такие приспособления позволяют последовательно без перенастройки базировать все заготовки партии, но стоимость этих приспособлений достаточно велика. Для малых партий деталей использование такого метода затратно.

Второй метод заключается в применении тактильных датчиков (головок «Renishaw») для быстрого определения базовых координат $X_0, Y_0,$

Z_0 непосредственно на станке (рис. 1). В отсутствие специальных приспособлений с помощью таких головок можно быстро настраивать нулевую точку детали, не прибегая к базированию заготовки на приспособлении или столе станка.



Рис. 1. Настройка «0» точки на станке

Заготовки устанавливаются прямо на столе станка, и с помощью головки «Renishaw» определяют не только «нулевую точку», но и разворот системы координат детали на станке. В этом случае процедуру настройки нужно повторять для каждой следующей детали партии. Для мелкосерийного и единичного производства это означает, что можно отказаться от изготовления специальных приспособлений. Такой прибор стоит около 150 тыс. рублей и требует квалифицированного обращения оператора станка. Оснащение каждого из имеющихся станков с ЧПУ такими устройствами эффективно только для сложных 5-координатных станков с большой стоимостью станкочаса.

В нашем университете предложен другой подход. Спроектирован и изготовлен координатный стол для контроля расположения заготовки в координатах приспособления-спутника вне станка (рис. 2).

Специальное программное обеспечение позволяет считывать значения X_0 , Y_0 и угол разворота U для ввода этих значений в УЧПУ станка. Для идентификации каждой конкретной детали может быть использовано штрих-кодирование. Использование такого прибора на участке станков с ЧПУ позволяет сократить время простоя станков под наладкой и отказаться от применения специальных приспособлений в пользу упрощенных приспособлений типа УСП. Предполагается, что приспособление-спутник устанавливается в определенную точку на столе станка. Положение приспособления-спутника на столе станка должно фиксироваться специальными упорами или другими базовыми элементами.

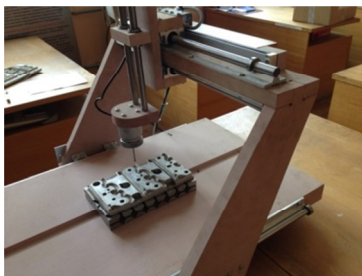
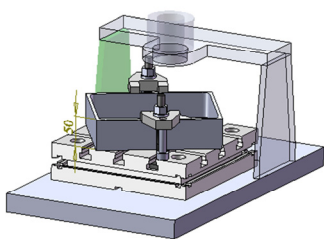


Рис. 2. Прибор для настройки «0» точки вне станка
а – 3D-модель; *б* – фотография установки

Расчетная схема определения координат «0» точки представлена на рис. 3.

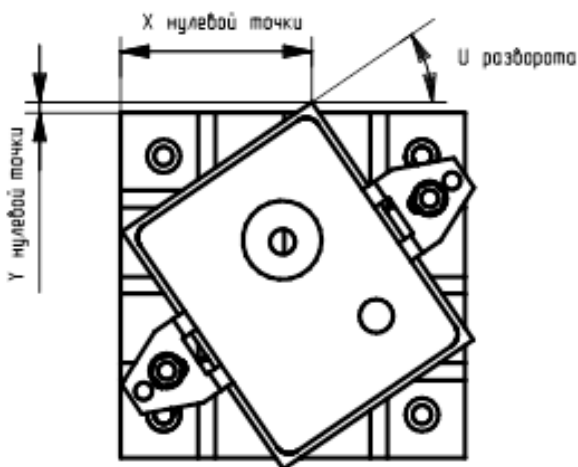


Рис. 3. Расчетная схема

Разработанный прибор также может заменить упомянутый ранее прибор для измерения параметров инструментов путем размещения специального гнезда для базирования инструмента на краю зоны измерений. Интегрированный подход к процедуре настройки станка на программную операцию показан на рис. 4.

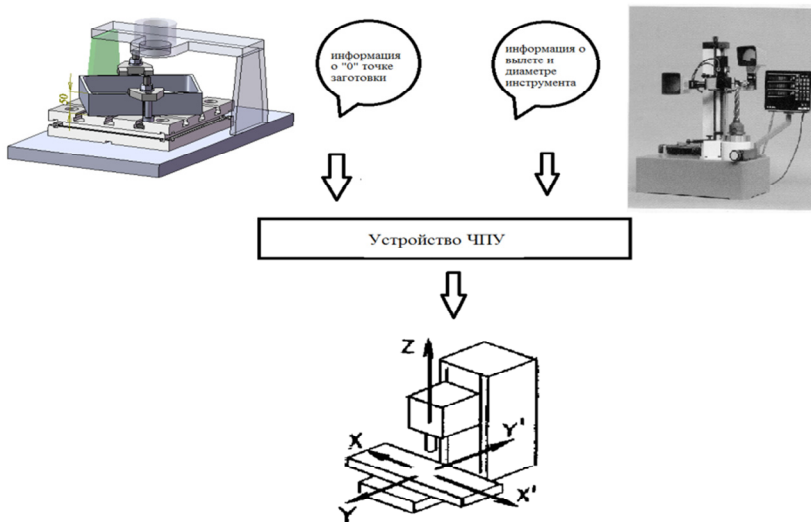


Рис. 4. Интегрированный подход к процедурам настройки станка с ЧПУ

Рассмотрим вопрос обеспечения точности настройки предложенным методом.

В случае настройки базовой точки с помощью специальных приспособлений суммарная погрешность $\Delta_{\Sigma 1}$ составит:

$$\Delta_{\Sigma 1} = \Delta_{Бзаг} + \Delta_{Бпр}, \quad (1)$$

где $\Delta_{Бзаг}$ – погрешность базирования заготовки в приспособлении

$$\Delta_{Бзаг} = \sqrt{\Delta_{баз}^2 + \Delta_{закр}^2}.$$

Погрешность базирования заготовки в приспособлении определяется точностью положения заготовки в приспособлении $\Delta_{баз}$ и погрешностью ее закрепления $\Delta_{закр}$.

Погрешность изготовления приспособления зависит от точности изготовления его деталей. Эта погрешность в общем случае не должна превышать 1/3...1/10 допуска на соответствующий размер детали.

$\Delta_{Бпр}$ – погрешность базирования приспособления на столе станка

$$\Delta_{Бпр} = \sqrt{\Delta_{баз}^2 + \Delta_{закр}^2}.$$

Погрешность базирования приспособления на столе станка определяется точностью положения приспособления на столе станка $\Delta_{баз}$ и погрешностью его закрепления $\Delta_{закр}$.

В случае настройки базовой точки с помощью измерительной головки погрешность $\Delta_{\Sigma 2}$ составит:

$$\Delta_{\Sigma 2} = \Delta_{датчика}, \quad (2)$$

где $\Delta_{датчика}$ – погрешность измерительной головки.

В случае настройки базовой точки с помощью координатного стола и измерительной головки погрешность $\Delta_{\Sigma 3}$ составит:

$$\Delta_{\Sigma 3} = \Delta_{Бпр} + \Delta_{КИМ}, \quad (3)$$

где $\Delta_{Бпр}$ – погрешность базирования приспособления – спутника на столе станка

$$\Delta_{Бпр} = \sqrt{\Delta_{баз}^2 + \Delta_{закр}^2}.$$

где $\Delta_{КИМ}$ – погрешность координатно-измерительной машины.

Отсюда следует, что при использовании измерительной головки отсутствуют погрешности, связанные с установкой приспособления на столе и базированием в нем заготовки. При настройке «0» точки вне станка, погрешность, связанная с установкой приспособления-спутника сохраняется, но она имеет систематический характер и может быть учтена устройством ЧПУ.

Рассмотрим еще одно преимущество применения метода настройки «0» точки вне станка.

Известно, что с целью обеспечения точности расположения обработанных поверхностей на станках с ЧПУ необходимо проведение размерного анализа. Особенно это актуально в тех случаях, когда конструкторская и технологическая базы для данной операции не совпадают. Рассмотрим пример, приведенный на рис. 5.

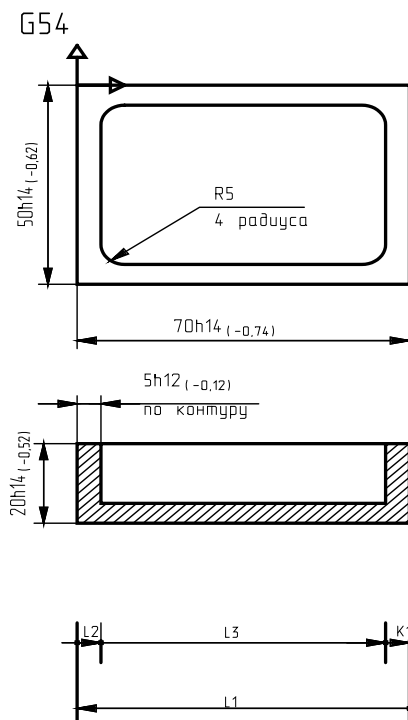
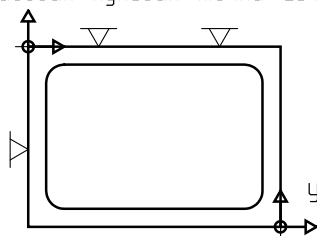


Рис. 5. Эскиз детали и расчетная схема для проведения размерного анализа

Конструктор задает требования равномерной толщины стенки для обеспечения жесткости корпусной детали. Традиционный метод базирования заготовки в специальном приспособлении позволяет достаточно точно выполнять размеры, заданные от технологической базы (L2). При этом размеры, заданные от противоположного края заготовки рассматриваются как замыкающие размеры (K1).

Результатом проведения размерного анализа как правило является вывод о том, что габаритные размеры детали (L1), выполненные на предшествующей операции, следует ужесточить. Такой подход не всегда эффективен, поэтому предложим другой вариант обработки (рис. 6).

Базовая нулевая точка G54



Установить локальную нулевую точку G55

Рис. 6. Использование локальной системы координат G55

Использование прибора для настройки «0» точки вне станка позволяет определить расположение поверхностей, являющихся конструктивными базами, но не совпадающих с технологическими базами. Таким образом, появляется возможность программирования рабочих ходов управляющей программы от локальных систем координат. Необходимость в размерном анализе отпадает, а точность получения размеров обеспечивается программным путем. Преимущества и недостатки указанных методов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение методов настройки нулевой точки заготовки
для программной операции**

Показатели	Использование специальных приспособлений	Использование тактильных датчиков на станке	Использование координатного стола
1. Необходимость спец. приспособления	да	нет	нет
2. Стоимость приспособления	около 30000	-	-
3. Время настройки станка	около 0,3 мин	около 10 мин	около 0,3 мин
4. Необходимость дополнительных устройств	нет	да	да
5. Стоимость дополнительных устройств	-	около 120 тыс. руб.	около 150 тыс. руб.

6. Обеспечение точности размеров, заданных не от технологической базы (без размерного анализа)	нет	нет	да
7. Необходимость спецобучения наладчика	нет	да	нет
8. Универсальность метода для настройки широкой номенклатуры деталей	нет	да	да
9. Возможность настройки «вылета» инструмента	нет	нет	да

Выводы

1. Использование метода настройки нулевой точки вне станка позволяет сократить время переналадки станков с ЧПУ на программную операцию по сравнению с использованием головки «Renishaw».

2. Разработанный прибор позволяет использовать вместо специальных приспособлений простейшие универсальные приспособления (например УСП).

3. Использование прибора позволяет получить заданную точность обработки без использования межоперационного размерного анализа и ужесточения допусков составляющих размеров.

РОЛЬ «ЗЕЛЕННЫХ» ТЕХНОЛОГИЙ В РЕШЕНИИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ РОССИЙСКОГО ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Е. Ю. Кузнецова¹, М. А. Журавская², А. А., Акулова¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Уральский государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург

Применение технологий «зеленой» логистики для транспортной системы России, призванных снизить вред окружающей среде, становится фактором ее конкурентоспособности, придает услуге «критерий качества». Среди множества направлений «зеленой логистики» авторы считают наиболее перспективными и приоритетными для российского транспортного рынка вопросы развития контейнерных перевозок и организации системы утилизации. Выявлены преимущества и ключевые сложности в организации контейнерных перевозок в России. Для преодоления существующих ограничений предложены стимулирующие условия, которые следует учитывать при расчете тарифов на перевозки и учитывающие влияние вида транспорта на экологию. Обсуждаются прямые и косвенные положительные эффекты утилизации как элемента обратной логистики для транспортного рынка Российской Федерации. Ставится задача формирования рынка утилизации как самостоятельной отрасли деятельности. В статье проанализирован отечественный и зарубежный опыт решения этих вопросов, сформулированы проблемы и задачи дальнейших исследований.

The application of the "green" logistics technologies for the Russian transport system is designed to reduce the damage to the environment, it becomes a factor in competitiveness, and gives the service "quality criterion". Among the many areas of "green logistics", the authors considered the most promising and priority for the Russian transport market the development of piggyback transport and the organization of utilization system. Advantages and key challenges in organizing piggyback in Russia are revealed. To overcome the current limitations, the enabling conditions are proposed, that should be taken into account when calculating the tariffs for transportation and take into account the impact of the mode of transport on the ecology. The authors discuss the direct and indirect positive effects of as part of reverse logistics for the transport market of the Russian Federation. The actual task is – the utilization market formation as an independent branch of ac-

tivity. The article analyzes the domestic and foreign experience in addressing these issues, were formulated problems and challenges for further research.

Введение

Глобализация экономики и научно-технический прогресс в XX в. привели к формированию мощных транспортных сетей, увеличению типов подвижного состава и усилению роли транспорта в мировой экономике. Транспорт, являясь одной из главных составляющих производственной и социальной инфраструктуры, позволяет обеспечить грузовое сообщение между объектами хозяйственной деятельности и пространственную мобильность населения. К примеру, по итогам 2013 г. пассажирооборот страны вырос на 12,8 %, грузооборот на 7 % по сравнению с 2010 г., что свидетельствует о значительном росте отрасли за последние годы [1].

Несмотря на это, в настоящее время перед транспортным комплексом страны стоит ряд стратегически важных задач. Одной из них является интеграция отечественного транспорта в мировую транспортную систему, что способствует развитию экономики страны и достижению основной цели: повышению конкурентоспособности отечественных товаров и услуг на мировом рынке. Достижение этой цели невозможно до тех пор, пока отечественные транспортные и логистические компании не будут ориентироваться на мировые тенденции «устойчивого развития».

Согласно исследованиям «Towards Sustainable Logistics» около 59 % опрошенных фирм считают, что «зеленые» технологии перевозки их продукции будут решающим фактором при выборе партнеров [2]. По данным исследования QSHE Global (опрос 5400 респондентов) [3], можно сделать вывод об отношении к внедрению экологических технологий в бизнес-процессы современных компаний:

- 61 % – заботится об окружающей среде;
- 67 % – выбирают партнеров, ориентированных на «зеленую логику»;
- 82 % – используют принципы «зеленой» логистики для улучшения имиджа;
- 30 % – готовы дополнительно платить за экологические технологии.

Следовательно, повышение конкурентоспособности транспортной системы страны и качества транспортного обслуживания невозможно без внедрения принципов «зеленой» логистики.

При такой постановке вопроса возникает необходимость рассмотрения и анализа различных «зеленых» технологий в транспортных и

транспортно-технологических системах; разработки различных методов и подходов для оценки эффективности этих технологий; определения зоны ответственности государства в создании и обеспечении рыночных механизмов, способствующих внедрению экологоориентированных технологий; формирования матрицы «зеленых» технологий для обеспечения различных сфер транспортной деятельности. Эти вопросы, как и многие другие, требуют дополнительных исследований и обсуждений.

Среди множества направлений «зеленой логистики» авторы считают наиболее перспективными для транспорта Уральского региона вопросы развития контейнерных перевозок и организации системы утилизации.

«Зеленая логистика» как путь развития

В общем смысле логистику рассматривают как науку о планировании, управлении и контроле движения материальных, информационных и финансовых ресурсов. Следовательно, можно говорить о том, что современные глобальные проблемы, связанные с ухудшением экологической ситуации, истощением ресурсов, социальные проблемы связаны с несовершенным подходом к организации логистических процессов, поэтому необходим такой методологический аппарат, который бы позволил устранить вредные экологические последствия логистических операций.

В 1987 г. впервые прозвучали слова о необходимости идти путем «устойчивого развития», подразумевая под этими словами обеспечение и удовлетворение нужд настоящего, не подвергая риску способность будущих поколений удовлетворять свои потребности [4].

В зарубежных источниках в последнее время встречается много работ, посвященных «зеленой логистике» как части устойчивого развития человечества, существует несколько точек зрения на ее место в хозяйственной деятельности, предлагаются различные подходы к управлению цепями поставок на стыке с экологией. Так, например, DeBurgos и Lorente [5] говорят об улучшении окружающей среды как об операционной цели, а поставки уже вторичны. Ваупманн и др. [6] уделяют особое внимание развитию зеленого продукта в узких рамках логистической цепи. Zisdin и Siferd [7] проводят обзор экологических закупок [8]. AbukhaderandJönson анализируют взаимодействие и взаимосвязи окружающей среды и логистики [8]. Kleindorfer и др. проводят обзор и оценку публикаций в области управления устойчивыми операциями, но рассматривают вопросы, связанные с цепочкой поставок [9]. Srivastava описывает обратную логистику [10]. Elkington утверждает, что интеграция интенсивно взаимосвязанных экономических, экологических и социальных аспектов устойчивости дает «тройной практический результат» [11].

Российские авторы предлагают понимать под термином «зеленая логистика» «...научно-практическую деятельность, направленную на оптимизацию и эффективное управление прямыми и обратными материальными и сопутствующими потоками (информационными, финансовыми, потоками отходов, вредных выбросов, различных природных ресурсов и энергии) с целью минимизации негативного воздействия на состояние окружающей среды» [12].

В рамках концепции «зеленой логистики» предлагается не просто снизить нагрузку на окружающую среду за счет сокращения выбросов и установки очистных сооружений, различных запретов и повышения налогообложения, предполагается качественно новый подход к организации производства путем внедрения инновационных технологий, использования новейшего энергосберегающего эффективного оборудования, переходу к ресурсосберегающим подходам эксплуатации техники и организации производства, рациональному использованию ресурсов и выводу устаревшей техники и оборудования из эксплуатации, с применением принципов обратной логистики. Роль последней в снижении влияния на экологию заключается в том, что она «замыкает» логистическую цепь и позволяет управлять жизненным циклом товара от добычи сырья до утилизации. При этом, учитывая рост стоимости сырьевых и энергоресурсов, переход к энергосберегающим принципам производства обещает быть экономически эффективным не только за счет эффекта общественного блага, но и повышения конкурентоспособности продукта, благодаря снижению себестоимости и маркетинговым усилиям.

На сегодняшний день наиболее яркий пример внедрения «зеленых» технологий принадлежит транспортно-логистической компании DHL, запустившей сервис GoGreen. Согласно данной программе, клиент платит на 3 % больше тарифа, в качестве компенсации за нанесенный экологии ущерб, вырученные деньги инвестируются в природоохранные меры по всему миру.

Немецкий Deutsche Bahn впервые в европейской железнодорожной отрасли предложил способ переправки грузов, полностью исключаящий выброс углекислого газа. В рамках проекта EcoPlus компания получает электричество для своих электровазов из возобновляемых источников энергии, привлекая дополнительные средства с компаний, чьи грузы перевозит, например, с концерна AUDI [13].

Среди отечественных транспортных компаний стратегии устойчивого развития придерживается ОАО «РЖД», реализуя ряд инновационных проектов, сопровождающихся ресурсосберегающими и экологичными технологиями: заменяется железнодорожное полотно, вводятся в экс-

плуатацию новые тепловозы и электровозы с повышенной энергоэффективностью.

Таким образом, говоря об автомобильном транспорте, можно сформулировать две основные задачи, решение которых предусматривает использование экологических технологий: 1) снижение доли вредных выбросов в атмосферу; 2) минимизация ресурсо- и энергозатрат.

Контрейлерные перевозки как элемент экологоориентированной логистики

В настоящий момент в рамках экологической программы ОАО «РЖД» проводит маркетинговые исследования привлекательности контрейлерных технологий на российском рынке, являющихся более экологичными комбинированными перевозками «автомобиль-железнодорожный транспорт» [14].

Контрейлерные перевозки впервые были организованы в центральной Европе, сочетая в себе преимущества автомобильного и железнодорожного транспорта, и представляют собой 3-этапную комбинированную перевозку груза. На начальном этапе груз перевозится автопоездом до железнодорожной станции, далее автомобиль (прицеп/полуприцеп) грузится на ж/д платформу и перевозится до конечной станции, от этой станции автомобиль, сошедший с платформы, доставляет груз конечному потребителю. Отличительной особенностью данных перевозок является именно перевозка автомобиля-тягача или автоприцепного состава на железнодорожной платформе основную часть маршрута.

Автотранспорт является одним из самых сильных загрязнителей воздуха, и, к сожалению, за последние годы эта тенденция слабо изменилась. В табл. 1 приведены данные по загрязнению воздуха различными источниками, из данных таблицы видно, что выбросы автомобильного транспорта составляют около 40 % от общих, при этом доля автомобильного транспорта составляет всего 4,9 % в общем грузообороте страны. Железнодорожный транспорт для сравнения, имея долю 43,2 % в грузообороте, имеет незначительную долю выбросов [15].

В настоящее время в Европе успешно реализуются контрейлерные перевозки как внутри одной страны, так и международные перевозки, в большинстве своем они представляют интермодальные технологии. Организаторы контрейлерного маршрута «Галларате (Италия) – Мейзен (Бельгия)» говорят о снижении затрат на транспортировку на 15–17 %, сокращении выбросов на 20 %, а потребления топлива на 2,5 млн л. Компания COMBIDEM, организующая контрейлерные перевозки во Франции, заявляет о снижении транспортных расходов на 10 %, снижения выбросов на 70–75 %.

Таблица 1

Доля выбросов по видам источников в 2008–2013 гг. (данные по РФ)

Год	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Общий объем выбросов, тыс.т/год, из них:	33691	32560	32220	32488	32309	31871
– от стационарных источников, тыс. т/год	20103	19021	19116	19162	19630	18447
% от стационарных источников	59,67	58,42	59,33	58,98	60,76	57,88
– от автомобильного транспорта, тыс. т/год	13588	13539	13105	13325	12679	13424
% от автомобильного транспорта	40,33	41,58	40,67	41,02	39,24	42,12
– от железнодорожного транспорта, тыс.т/год	н/д	н/д	н/д	140	159,5	192,5
% от железнодорожного транспорта	–	–	–	0,004	0,005	0,006

Анализ мнений исследователей и ученых в области контрейлерных перевозок [14, 16–19], позволил сформировать таблицу с преимуществами данного вида организации перевозок и барьерами на пути его развития (табл. 2). Основные трудности в организации контрейлерных перевозок в России связаны с необходимостью создания соответствующей инфраструктуры и нормативно-правовой базы.

Для преодоления существующих ограничений необходимо создать стимулирующие условия на рынке транспортных услуг. Предлагается система штрафов и поощрений при расчете тарифов по видам транспорта [20]. Этот метод учитывает влияние вида транспорта на экологию в виде повышающих или понижающих коэффициентов для постоянных и переменных затрат. Использование этих коэффициентов позволяет сместить точку смены сценария транспортного обслуживания (SP-change point) [21], которая рассчитывается как отношение разницы постоянных затрат по видам транспорта к разнице переменных затрат по видам транспорта, ближе к началу координат, что уменьшает зону эффективного действия автомобильного транспорта (значения F_2, V_2) и увеличивает ее для железнодорожного (F_1, V_1) (рис. 1). Подобная схема формирования тарифов напрямую способствуют развитию контрейлерных перевозок.

**Преимущества и ограничения организации
контрейлерных перевозок в России**

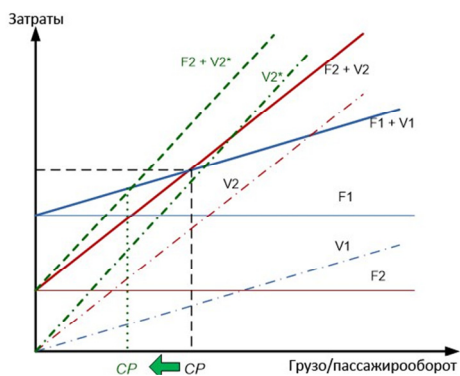
Преимущества	Ограничения
<ul style="list-style-type: none"> – снижение вредных выбросов; – экономическая эффективность при перевозках на расстояния свыше 1000 км; – разгрузка автомобильных дорог мегаполисов; – снижение нагрузки на дорожное полотно; – ускоренное прохождение таможенных пунктов 	<ul style="list-style-type: none"> – необходимость создания специализированного подвижного состава; – отсутствие действующих моделей данного вида перевозок, организованных на «длинные» маршруты (в России средняя дальность составляет 3–4 тыс. км, в Европе 700–800 км); – отсутствие нормативно-правовой базы для сопровождения перевозок; – отсутствие тарифной базы на контрейлерные перевозки

Однако, несмотря на существенные недостатки автомобильного транспорта (высокая доля выбросов, низкая безопасность), отказаться полностью от автомобильных перевозок не получится, поскольку только они позволяют организовать доставку «от двери до двери», а для некоторых районов это по-прежнему единственный доступный вид транспорта. Следовательно, необходимо разработать организационную схему экологических решений для автомобильного транспорта на каждом из этапов его жизненного цикла.

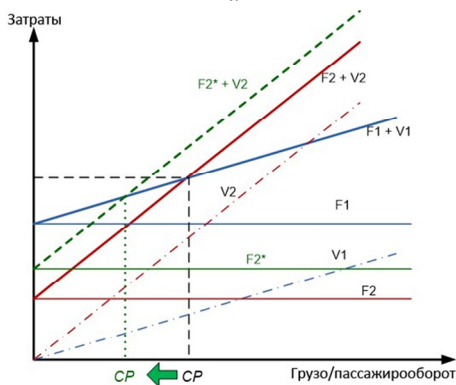
Утилизация как элемент ресурсосберегающих технологий

Вторым направлением развития «зеленой» логистики, очевидным для развития российского транспортного рынка, является решение проблем утилизации как части «обратной логистики». Для транспортного комплекса России, и особенно для его автомобильной составляющей, управление этапом жизненного цикла «спад» является особенно актуальным, поскольку больше половины автопарка страны морально и физически устарело. Сбалансированное развитие отрасли возможно только при постоянном совершенствовании структуры ее основных фондов, поэтому их рост и обновление является важнейшим условием обеспечения «устойчивого развития» отрасли.

На сегодняшний день возрастной анализ структуры автомобильного парка (табл. 3) показывает, что значительная часть транспортных единиц эксплуатируется за пределами нормативного срока службы, другая, также значительная, часть приближается к этому сроку. Как следствие, существенно ухудшаются экологические показатели, показатели безопасности и экономической эффективности работы транспорта.



a



б

Рис. 1. Смещение точки смены сценария транспортного обслуживания (CP) при введении зеленых штрафов: *a* – для постоянных затрат; *б* – переменных затрат автотранспорта

Таблица 3

Возрастной состав подвижного состава на конец 2013 года [15]

Возрастная структура парка автомобильного транспорта, %			
Тип АТС	до 5 лет	5–10 лет	Более 10
Грузовые автомобили	21,8	20,1	58,1
Автобусы	27,0	27,7	45,3
Легковые автомобили	30,7	24,6	44,7

Многие исследователи в рамках устойчивого развития, занялись вопросами обратной логистики («reverse logistics»), которая описывает движение материальных потоков от конечной точки потребления продукта до начала нового жизненного цикла.

Создание системы утилизации транспортных средств будет иметь комплексный положительный эффект. Во-первых, снижение вредных выбросов и издержек, повышение безопасности перевозок и энергоэффективности благодаря стимулированию обновления автопарка. Первый эксперимент по утилизации легковых автомобилей, проведенный в России в 2010–2012 гг., дал двойной бюджетный эффект, а рост добавленной стоимости составил около 150 млрд руб. при затратах в 30 млрд руб. Во-вторых, ресурсосбережение за счет вторичного использования материалов, так, по данным западных ученых, утилизация автомобиля среднего класса массой около 1 т, позволяет сэкономить 3300 кг материальных ресурсов, снизить расход энергии на 56 000 МДж, уменьшить выбросы вредных веществ на 1945 кг. В-третьих, снижение уровня загрязнения окружающей среды автомобилями, вышедшими из эксплуатации, а также сокращение площадей, необходимых для их складирования.

В европейских странах рынок утилизации уже давно относится к самостоятельной отрасли деятельности. По словам представителя Европейской ассоциации автопроизводителей, прибыль от переработки одного автомобиля в ЕС составляет около 340 евро, а с вычетом платы за аренду земли, помещения, амортизации оборудования – примерно 300. В Германии, европейском лидере по количеству авто (43,4 млн ед. на 81 млн населения), ежегодно в среднем утилизируется 450 тыс. машин, а в некоторые годы, когда запускаются программы рециклинга, аналогичные нашей 2010–2011 гг., до 2 млн старых авто.

Еще одним примером успешного формирования утилизационной отрасли являются Нидерланды. Коэффициент утилизации автомобилей в Голландии по результатам 2011 г. составил 96,2 % и является самым высоким в мире, а главное, что финансирование этой системы с каждым годом требует все меньше дополнительных ресурсов. Здесь с покупателя берут утилизационный налог в размере 45 евро, который входит в стоимость нового автомобиля.

В отличие от зарубежных стран, отечественная отрасль утилизации находится сегодня в зачаточной стадии, поэтому необходимо разработать рыночные механизмы, стимулирующие участие в вопросах утилизации не только частного сектора и автопроизводителей, но и других субъектов транспортного комплекса РФ.

Заключение

Рассмотренные в статье направления «зеленой» логистики не являются единственными на пути к устойчивому развитию транспортной системы страны. Отдельного внимания заслуживает вопрос формирования алгоритма выбора тех или иных «зеленых» подходов в зависимости от назначения и этапа жизненного цикла транспортной единицы.

Авторы в дальнейшем видят необходимость более подробно исследовать методы управления заключительным этапом жизненного цикла, поскольку с каждым годом актуальность этого вопроса только возрастает. В частности, предполагается создание организационной схемы рынка утилизации и ее оптимизация внутри транспортно-технологической системы страны.

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2013 году». URL: <http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/6c7/gosdokladeco.pdf>.

2. *Christof Dr., Ehrhart E.* Delivering Tomorrow: Towards Sustainable Logistics. 2012. URL: <http://www.delivering-tomorrow.com>

3. *Alexandrova K.* The links of one Chain // The RZD Partner International. 2014. № 3(39). P. 38–39.

4. «ТРАНСПОРТ РОССИИ». Информационно-статистический бюллетень. URL: http://www.mintrans.ru/upload/iblock/5cd/stat_2014.pdf.

5. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. URL: <http://upload.wikimedia.org/wikisource/en/d/d7/our-common-future.pdf>.

6. *Тамбовцев А., Тамбовцева Т.*, Зеленая логистика для устойчивого развития // Management and sustainable development. 2/2011. (29).

7. *De Burgos Jiménez J., Céspedes Lorente J. J.* Environmental performance as an operations objective // International J. of Operations & Production Management. 2001. № 21 (12). P. 1553–1572.

8. *Baumann H., Boons F., Bragd A.* Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives // J. of Cleaner Production. № 10 (5). 2002. P. 409–425.

9. *Zsidisin, G. A., Siferd, S. P.* Environmental purchasing: a framework for theory development // European J. of Purchasing & Supply Management. 2001. № 7 (1). P. 61–73.

10. *Abukhader S. M., Jönson G.* Logistics and the environment: is it an established subject? // International J. of Logistics: Research and Applications. 2004. № 7 (2). P. 137–149.

11. *Kleindorfer P. R., Singhal K., Van Wassenhove L. N.* Sustainable operations management, Production and Operations Management. 2005. № 14 (4). P. 482–492.
12. *Srivastava S. K.* Green supply-chain management: a state-of the-art literature review // International J. of Management Reviews. 2009. № 9 (1). P. 53–80.
13. *Elkington J.* Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. Capstone. Oxford. 1997. P. 402.
14. *Кизим А. А., Кабертай Д. А.,* Современные тренды «зеленой» логистики в условиях глобализации // Вестн. Южного федерал. округа. 2012. № 8.
15. *Журавская М. А., Макаренко И. О.* Контейнерные перевозки как точка роста логистического бизнеса ОАО «Российские железные дороги» // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 74–79.
16. *Багинова В. В., Кузьмин Д. В.,* Особенности развития контейнерных перевозок в России // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 4.
17. *Холопов К. В.* Зарубежный опыт и направления развития международных контейнерных перевозок в России // Рос. внешнеэконом. вестник. 2011. № 9.
18. *Кириллова А. Г.* Современные технологии перевозок – контейнерные поезда // Железнодорожный транспорт. 2011. № 2.
19. *Кузьмин Д., Белых А.* Актуальные проблемы организации контейнерных перевозок в условиях рынка // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 4.
20. *Журавская М. А.* «Зеленая» логистика – стратегия успеха в развитии современного транспорта // Вестн. УрГУПС. 2015. № 1 (25). С. 38–48.
21. *Журавская М. А., Казаков А. А., Пасюрова П. А.* О размещении остановочных пунктов при осуществлении мультимодальных пассажирских перевозок // Транспорт Урала. 2012. № 4. С. 50–53.

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДШИПНИКОВ МОТОР-ШПИНДЕЛЯ С ИСКУССТВЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ

Я. Л. Либерман

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

В статье рассматривается система стабилизации температуры мотор-шпинделя с маслораспылителем для высокоскоростных металлорежущих станков, разработанная на основе фаззи-логики. Описываются принципы ее построения, устройство фаззи-регулятора и алгоритм его функционирования, обеспечивающий управление производительностью маслораспылителя при изменении температуры подшипников мотор-шпинделя и скорости ее нарастания.

This paper covers the fuzzy logic based temperature stabilization system for motor spindles with oil spray lubrication in high speed cutting machine tool. Principles of building such systems, fuzzy-regulator structure and algorithm, providing control of oil spray performance according to temperature deviation and temperature deviation speed of motor spindle bearings, are described.

Стремление повысить производительность и качество механообработки влечет за собой все более и более широкое распространение высокоскоростного резания. Такое резание осуществляется, главным образом, на станках, оснащенных мотор-шпинделями с быстроходностью, достигающей $n \cdot d \approx (2 \dots 3) 10^6$ мм/мин., где d – диаметр передней опоры шпинделя (мм), n – частота вращения (об/мин.) [1]. Для реализации подобной быстроходности обычно применяют специальные гибридные (со стальными кольцами и керамическими шариками) радиально-упорные подшипники и новые системы масловоздушной смазки [2, 3].

Существующие системы масловоздушной смазки содержат довольно сложный регулятор, управляющий маслораспылителем и стабилизирующий температуру подшипников практически во всем диапазоне скорости резания. Строится он на основе математического моделирования тепловых процессов, происходящих в подшипниках, и поскольку точно описать указанные процессы невозможно, как правило, имеет невысокую точность. Вместе с тем, используя опыт квалифицированных рабочих-операторов, обслуживающих высокоскоростные станки, точность управления маслораспылителем можно повысить, а системы масловоздушной смазки упростить. Это можно осуществить, применяя элементы

искусственного интеллекта, базирующиеся на математическом аппарате нечеткой логики или фаззи-логики.

Главным звеном любой системы управления, базирующейся на фаззи-логике, является фаззи-регулятор, действие которого основано на знаниях экспертов, способных сформулировать базу правил в форме

ЕСЛИ (предпосылка), ТО (вывод) [4].

С учетом имеющихся знаний строится база данных с функциями принадлежности для предпосылок (входных переменных) и выводов (выходной переменной). В рассматриваемом случае функциями принадлежности для предпосылок могут быть $f(\Delta t)$ и $f(V_t)$, а для выводов – $f(Q)$, где Δt – отклонение температуры переднего подшипника шпинделя от нормы t_0 , V_t – скорость изменения его температуры, Q – производительность маслораспылителя.

Функция принадлежности в общем случае – это функция, показывающая, в какой степени (насколько) элементы некоторого множества обладают характеристическим свойством, используемым для задания этого множества [5]. Самой простой является треугольная функция принадлежности вида

$$f(x, a, b) = |x-a|/b, \quad (1)$$

где x – переменная; a и b – параметры.

Такая функция обладает достаточной адаптационной способностью, а потому в качестве $f(\Delta t)$, $f(V_t)$ и $f(Q)$ при разработке требуемой системы приняли именно ее.

Для конкретизации параметров кривой (1) применительно к лингвистическим переменным Δt , V_t , Q и их интервалам, обозначенным, как это принято в нечеткой логике, символическими именами – термами, вначале потребовалось описать знания экспертов в виде эвристических постулатов:

- если отклонение температуры малое (М) и скорость изменения температуры малая (М), то производительность маслораспылителя должна быть очень малой (ОМ);
- если отклонение температуры малое (М) и скорость изменения температуры средняя (С), то производительность маслораспылителя должна быть малой (М);
- если отклонение температуры малое (М) и скорость изменения температуры большая (Б), то производительность маслораспылителя должна быть средней (С);

- если отклонение температуры среднее (С) и скорость изменения температуры малая (М), то производительность маслораспылителя должна быть малой (М);
- если отклонение температуры среднее (С) и скорость изменения температуры средняя (С), то производительность маслораспылителя должна быть средней (С);
- если отклонение температуры среднее (С) и скорость изменения температуры большая (Б), то производительность маслораспылителя должна быть большой (Б);
- если отклонение температуры большое (Б) и скорость изменения температуры малая (М), то производительность маслораспылителя должна быть средней (С);
- если отклонение температуры большое (Б) и скорость изменения температуры средняя (С), то производительность маслораспылителя должна быть большой (Б);
- если отклонение температуры большое (Б) и скорость изменения температуры большая (Б), то производительность маслораспылителя должна быть очень большой (ОБ).

Максимальное значение всякой функции принадлежности, по определению, равно 1. Правомерно полагать, что значения функций, соответствующих двум соседним термам, в точке их пересечения равны 0,5 [4]. Учитывая это и исходя из типичных условий эксплуатации высокоскоростных станков, были получены интерпретации функции принадлежности типа треугольной для трех термов лингвистической переменной Δt , трех термов лингвистической переменной V_i и пяти термов лингвистической переменной Q (табл. 1, рис. 1).

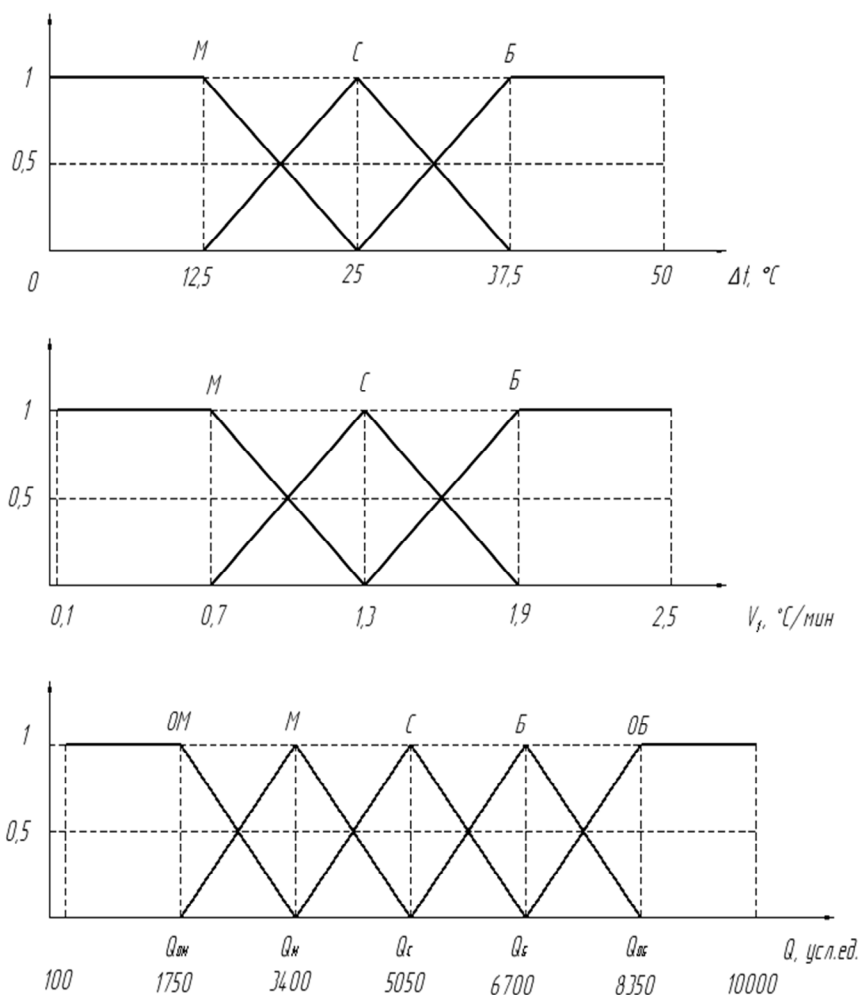


Рис. 1. Графики функций принадлежности

Таблица 1

Интерпретации функции принадлежности

Лингвистическая переменная	Обозначение термина	Интервал, соответствующий терму	Функция принадлежности, соответствующая терму
Δt	М	[0; 12,5]	$f_1(\Delta t) = 1$
		[12,5; 25]	$f_1(\Delta t) = (25 - \Delta t)/12,5$
	С	[12,5; 25]	$f_2(\Delta t) = (\Delta t - 12,5)/12,5$
		[25; 37,5]	$f_2(\Delta t) = (37,5 - \Delta t)/12,5$
	Б	[25; 37,5]	$f_3(\Delta t) = (\Delta t - 25)/12,5$
		[37,5; 50]	$f_3(\Delta t) = 1$
V_t	М	[0,1; 0,7]	$f_1(V_t) = 1$
		[0,7; 1,3]	$f_1(V_t) = (1,3 - V_t)/0,6$
	С	[0,7; 1,3]	$f_2(V_t) = (V_t - 0,7)/0,6$
		[1,3; 1,9]	$f_2(V_t) = (1,9 - V_t)/0,6$
	Б	[1,3; 1,9]	$f_3(V_t) = (V_t - 1,3)/0,6$
		[1,9; 2,5]	$f_3(V_t) = 1$
Q	ОМ	[100; 1750]	$f_1(Q) = 1$
		[1750; 3400]	$f_1(Q) = (3400 - Q)/1650$
	М	[1750; 3400]	$f_2(Q) = (Q - 1750)/1650$
		[3400; 5050]	$f_2(Q) = (5050 - Q)/1650$
	С	[3400; 5050]	$f_3(Q) = (Q - 3400)/1650$
		[5050; 6700]	$f_3(Q) = (6700 - Q)/1650$
	Б	[5050; 6700]	$f_4(Q) = (Q - 5050)/1650$
		[6700; 8350]	$f_4(Q) = (8350 - Q)/1650$
	ОБ	[6700; 8350]	$f_5(Q) = (Q - 6700)/1650$
		[8350; 10000]	$f_5(Q) = 1$

Это позволило организовать сформулированные правила в виде матрицы (табл. 2).

Таблица 2

Матрица правил

Отклонение температуры Δt	Скорость изменения температуры V_t		
	М	С	Б
М	ОМ	М	С
С	М	С	Б
Б	С	Б	ОБ

С помощью этой матрицы нетрудно производить операцию фаззификации – установление соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной и значением функции принадлежности соответствующего ей терма переменной. Поскольку нечеткая логика предполагает возможность частичного наложения термов, в процессе фаззификации не исключено получение нескольких значений функции принадлежности, соответствующих одному значению лингвистической переменной. Для того чтобы остановиться на одном из полученных значений, после фаззификации обычно проводят агрегирование. Эта операция представляет собой процедуру определения степени истинности найденных значений функции принадлежности и установление связи между ними, описываемой чаще всего либо логическим «и», либо логическим «или». В данном случае указанная связь описана как «и».

После агрегирования фаззи-регулятор должен выполнять активирование – операцию, направленную на расширение агрегирования на все правила, описанные матрицей. Эта операция аналогична композиции нечетких отношений и в рассматриваемом случае была выполнена простейшим образом – по условию минимума. Это дало возможность далее достаточно легко (по правилу максимума) осуществить операцию аккумулялирования – процедуру отыскания значения функции принадлежности входного параметра регулятора.

Операции агрегирования, активирования и аккумулялирования в совокупности представляют собой механизм нечетких выводов, в результате которых переменной Δt присваивается значение $\Delta t'$, переменной V_t – значение входной переменной V_t' и обусловленные этим функции $f(\Delta t) = f(\Delta t')$ и $f(V_t) = f(V_t')$ дают вполне определенную функцию $f(\Delta t', V_t', Q)$. Если теперь произвести операцию дефаззификации – отыскание по $f(\Delta t', V_t', Q)$ величины Q' (удобнее всего для этого применить метод центра тяжести [4]), то нетрудно получить значение требуемой производительности маслораспылителя, отвечающее исходной базе знаний.

Построенный на основе описанных принципов фаззи-регулятор был использован в составе системы управления, показанной на рис. 2.

Функциональная схема системы содержит датчик температуры, два аналого-цифровых преобразователя АЦП1 и АЦП2, фаззи-регулятор, цифроаналоговый преобразователь и регулируемый маслораспылитель. Кроме них она включает задатчик нормальной температуры подшипника t_0 , первый компаратор, прямой вход которого соединен с датчиком температуры, вычитающий вход – с задатчиком t_0 , а выход – с АЦП1, блок задержки выходного сигнала первого компаратора на время τ и второй компаратор, связанный с этим блоком, с выходом первого компаратора и со входом АЦП2. В систему входит также усилитель с регулируемым коэффициентом усиления k , установленный между ЦАП и маслораспылителем, и задатчик k .

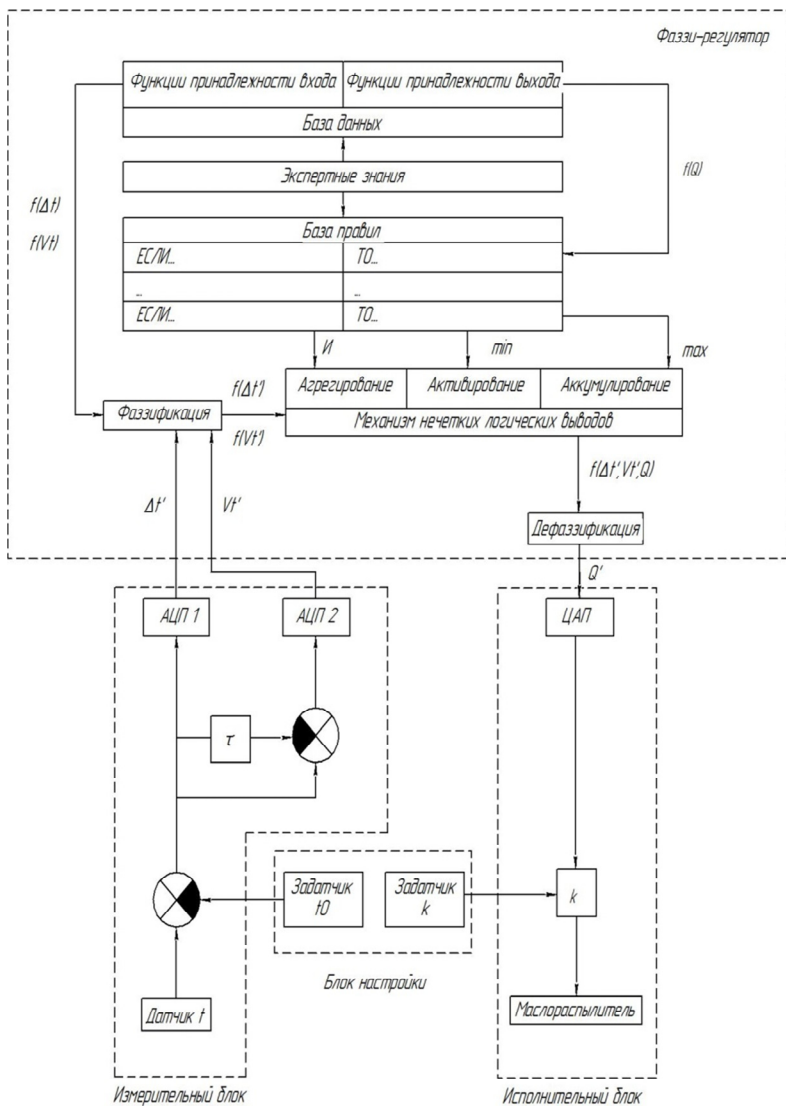


Рис. 2. Функциональная схема системы

Алгоритм работы фаззи-регулятора представлен на рис. 3. В нем 1 – начало; 2 – ввод отклонения температуры $\Delta t'$ от номинального значения t_0 и скорости изменения температуры V_t' ; 3 – проверка принадлежности значений $\Delta t'$ и V_t' допустимым диапазонам ($\Delta t' \in [0; 50]$; $V_t' \in [0,1; 2,5]$); 4 – фаззификация входных переменных; 5, 7 – проверка принадлежности $\Delta t'$ интервалам $[0; 25]$, $[12,5; 37,5]$, $[25; 50]$; 6, 8, 9 – присвоение функции принадлежности $f(\Delta t)$ значения $f(\Delta t')$, соответствующего интервалу; 10, 12 – проверка принадлежности V_t' интервалам $[0,1; 1,3]$, $[0,7; 1,9]$, $[1,3; 2,5]$; 11, 13, 14 – присвоение функции принадлежности $f(V_t)$ значения $f(V_t')$, соответствующего интервалу; 15 – активирование по условию минимума функций принадлежности $f(\Delta t', V_t', Q)$ с помощью формул типа

$$f_{OM}(Q) = f_{OM}(\Delta t', V_t', Q) = \min\{f_M(\Delta t'); f_M(V_t')\},$$

$$f_M(Q) = f_M(\Delta t', V_t', Q) = \min\{f_C(\Delta t'); f_M(V_t')\},$$

$$f_M(Q) = f_M(\Delta t', V_t', Q) = \min\{f_M(\Delta t'); f_C(V_t')\},$$

$$f_C(Q) = f_C(\Delta t', V_t', Q) = \min\{f_B(\Delta t'); f_M(V_t')\},$$

.....;

16 – аккумулярование по правилу максимума функций принадлежности $f(\Delta t', V_t', Q)$ по формуле

$$f_i(Q) = f_i(\Delta t', V_t', Q) = \max\{f_i(\Delta t', V_t', Q)_1; f_i(\Delta t', V_t', Q)_2; \dots\};$$

17 – дефаззификация выходной переменной производительности маслораспылителя Q' по формуле

$$Q' = [f_{OM}(Q) \cdot Q_{OM} + f_M(Q) \cdot Q_M + f_C(Q) \cdot Q_C + f_B(Q) \cdot Q_B + f_{OB}(Q) \cdot Q_{OB}] / [f_{OM}(Q) + f_M(Q) + f_C(Q) + f_B(Q) + f_{OB}(Q)];$$

18 – вывод значения Q' ; 19 – конец.

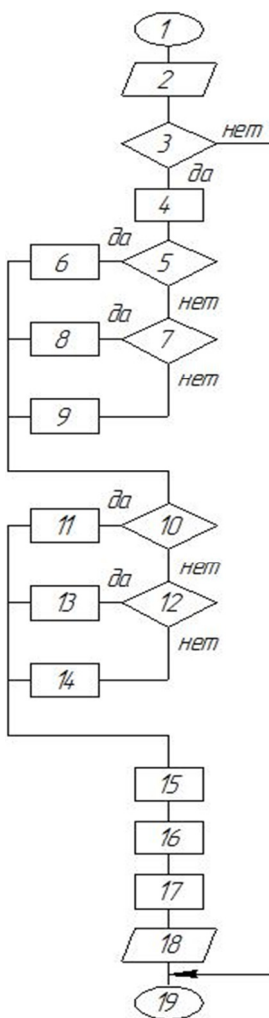


Рис. 3. Алгоритм работы фаззи- регулятора

Проиллюстрируем сущность алгоритма примером.

Допустим, имеет место отклонение температуры, равное 30 град и оно родолжает увеличивться со скоростью 1,5 град/мин. В этом случае термы С и Б отклонения температуры имеют степень принадлежности соответственно 0,6 и 0,4, а термы С и Б скорости изменения

температуры равны 0,33 и 0,67. Остальные термы имеют степень принадлежности, равную 0 (рис. 4).

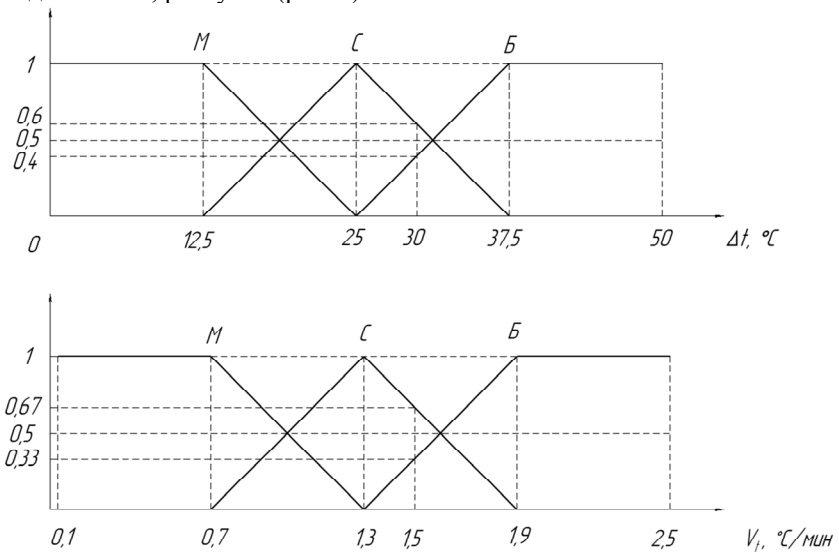


Рис. 4. Графики функций принадлежности для заданных значений отклонения температуры $\Delta t'$ и скорости ее изменения V_t'

Поскольку для принятой формы записи правил степень принадлежности antecedента каждого правила определяется по минимуму всех условий, то для вывода имеют значения только правила, содержащие условия с ненулевыми степенями принадлежности:

1. Если $\Delta t = C$ и $V_t = C$, то $Q = C$;
2. Если $\Delta t = C$ и $V_t = B$, то $Q = B$;
3. Если $\Delta t = B$ и $V_t = C$, то $Q = B$;
4. Если $\Delta t = B$ и $V_t = B$, то $Q = OC$.

Каждое из этих правил дает степень принадлежности выводу по минимуму:

1. $m_C(Q) = \min\{m_C(\Delta t'); m_C(V_t')\} = \min\{0,6; 0,67\} = 0,6$;
2. $m_B(Q) = \min\{m_C(\Delta t'); m_B(V_t')\} = \min\{0,6; 0,33\} = 0,33$;
3. $m_B(Q) = \min\{m_B(\Delta t'); m_C(V_t')\} = \min\{0,4; 0,67\} = 0,4$;
4. $m_{OB}(Q) = \min\{m_B(\Delta t'); m_B(V_t')\} = \min\{0,4; 0,33\} = 0,33$.

Для формирования нечеткого вывода определим далее степень принадлежности термов выходной переменной по максимуму. Например, выражения п.п. 2 и 3 дают разные значения степени принадлежности для терма Б, но берется максимальное:

$$m_B(Q) = \max\{m_B(Q)_2; m_B(Q)_3\} = \max\{0,33; 0,4\} = 0,4.$$

Таким образом, при данном состоянии выходных сигналов степени принадлежности термов выходной переменной имеют значения (рис. 5):

$$\{m_{OM}; m_M; m_C; m_B; m_{OB}\} = \{0; 0; 0,6; 0,4; 0,33\}.$$

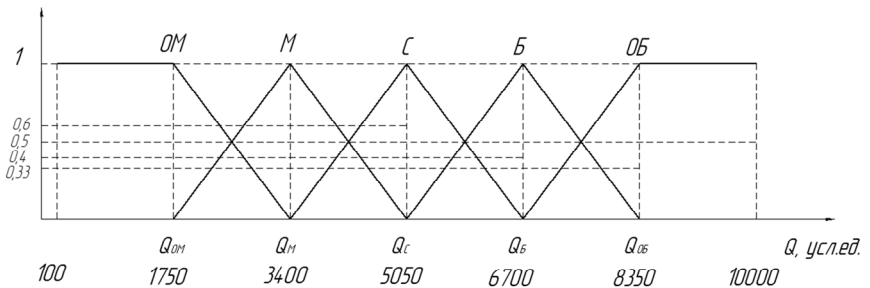


Рис. 5. График функции принадлежности для выходного параметра Q

Для перехода от нечетких выводов к управляющему воздействию выполним дефаззификацию по методу центра тяжести:

$$Q' = \frac{Q_{OM}m_{OM} + Q_Mm_M + Q_Cm_C + Q_Bm_B + Q_{OB}m_{OB}}{m_{OM} + m_M + m_C + m_B + m_{OB}}$$

и получим

$$Q' = \frac{0 + 0 + 5050 \cdot 0,6 + 6700 \cdot 0,4 + 8350 \cdot 0,33}{0 + 0 + 0,4 + 0,6 + 0,33} = 6365.$$

Описанный алгоритм был программно реализован в соответствии с [6] и технически реализован в опытном образце системы на типовом микроконтроллере М68НС11 со встроенными АЦП и ЦАП. В качестве датчика температуры был использован термопреобразователь сопротивления ТСП–1388. Конструкция маслораспылителя была выполнена аналогично применяемой во фрезерном станке РФП–12. По современным ценам на перечисленные элементы, сборку и программирование системы общие затраты на ее изготовление составили ≈ 4000 рублей. В процессе испытаний опытного образца было установлено, что колебания температуры подшипников во всем диапазоне возможных режимов экс-

плуатации системы не превышают ± 2 град. Такая точность и сравнительно низкая стоимость, по-видимому, делают предложенную систему достаточно перспективной.

1. Металлорежущие станки : в 2 т. Т. 2 / В. В. Бушуев, А. В. Ерёмин, А. А. Какойло и др. ; под ред. В. В. Бушуева. Т. 2. М.: Машиностроение, 2011. 584 с.

2. *Либерман Я. Л., Плюхина Е. А.* Высокоскоростной шпиндельный узел металлорежущего станка : патент РФ № 102553, МПК В23В 19/02, по заявке 2010108050/02 от 04.03.2010, опубл. 10.03.2011. Бюл. № 7. Патентообладатель УрФУ.

3. *Либерман Я. Л.* Система термостабилизации шпиндельного узла металлорежущего станка : Патент РФ № 116387, МПК В23В 19/02, по заявке 2011148419/02 от 28.11.2011, опубл. 27.05.2012. Бюл. № 15. Патентообладатель УрФУ.

4. *Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н.* Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Изд. Центр «Академия», 2004. 576 с.

5. *Леоненков А. В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

6. *Либерман Я. Л., Боярских Ю. Д.* Система термостабилизации шпиндельного узла металлорежущего станка с использованием нечеткой логики (termo) : Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2013613165 по заявке 2013610944 от 05.02.2013. Зарегистрировано в госреестре 27.03.2013. Правообладатель УрФУ.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ ЛЛВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ

В. В. Максаров, Д. Ю. Тимофеев, А. Е. Ефимов

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург

В данной статье рассмотрен метод повышения эффективности процесса резания за счет создания локального лазерного воздействия на обрабатываемый материал. Повышение эффективности процесса резания достигается за счет динамической устойчивости ТСМО. Обеспечение динамической устойчивостью осуществляется по средствам подавления автоколебательного процесса. Одним из наиболее эффективных методов является нанесение предварительного локального лазерного воздействия на поверхность обрабатываемого материала по специальной траектории. Нанесение ЛЛВ позволит создать локальную метастабильность в поверхностном слое обрабатываемой заготовки. Таким образом, после нанесения ЛЛВ структура локальной зоны будет характеризоваться наличием закаленного слоя с определенной степенью перегрева и переходного слоя с неполной закалкой. Такое изменение структуры в локальной зоне приведет в процессе обработки при пересечении плоскости резания с зоной локального лазерного воздействия к мгновенному изменению напряженно-деформированного состояния, подавлению автоколебательного процесса технологической системы, что положительно скажется на улучшении качества обработанной поверхности и стойкости режущего инструмента.

In this article considers the method increasing the efficiency of cutting due to creation of a local laser influence on the processed material. Improving the efficiency of the process of cutting is achieved due to the dynamic stability TSMP. Providing dynamic stability is carried out by means of the suppression of the self-oscillation process. One of the more effective methods is to apply a pre-local laser influence on the surface of of the processed material on a special trajectory. The application LLI will create local metastability in the surface layer of the workpiece. Thus, after application LLI structure the local zone will be characterized by a hardened layer with a certain degree of superheat and of the transition layer of incomplete hardened. Such a change in the structure of the local zone will lead in process of processing when crossing to the cutting plane with a local zone laser influence to the instantaneous change in the stress-strain state, suppression of the self-

oscillation of the technological system, which positively impact on improving the quality and steadfastness of the treated surface and of the cutting tool.

В современном машиностроительном производстве выделяют широкий класс изделий, обработка которых требует особого подхода при решении задач по повышению эффективности процесса точения. К данному классу изделий относятся, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали и сплавы, обработка которых производится на станках с ЧПУ.

Для того чтобы повысить эффективность процесса точения необходимо, чтобы технологическая система механической обработки (ТСМО) обладала динамической устойчивостью.

Однако при осуществлении процесса точения возникают вибрации в ТСМО характеризующиеся возмущающими силами и свойствами упругой системы. Соотношение между этими параметрами определяет возможность возникновения вредных вибраций и их интенсивность, т. е. амплитуду и частоту. Возмущающие силы в зависимости от физической сущности механизма возбуждения вибраций, действующего на технологическую систему, приводят к образованию вынужденных колебаний и автоколебаний. Появление возмущения в упругой системе приводит к изменению состояния деформированной зоны и к соответствующему изменению сил резания. Это изменение не может распространяться мгновенно на всю зону, что вызывает запаздывание в изменении силы. Наличие запаздывающих сил, раскачивающих замкнутую технологическую систему, приводит к возникновению автоколебательного процесса при обработке точением.

Потеря устойчивости процесса точения и возникновение автоколебаний ведет к повышению интенсивности изнашивания режущего инструмента и снижению долговечности исполнительных механизмов станка. Наличие вибраций обуславливает ухудшение качества поверхностного слоя заготовки и точности обработки, что, в свою очередь, приводит к снижению производительности обработки и ограничению технологических возможностей оборудования.

Наиболее распространенными методами борьбы с вибрациями при резании являются методы, которые используют виброгасители, а также использование в конструкции режущего инструмента элементов из материалов с высокими демпфирующими свойствами. Эффект гашения автоколебаний с помощью демпфирующих материалов является наиболее перспективным направлением, т. к. скрывает в себе наибольшие производственные возможности (отпадает надобность в специальных сложных виброгасящих устройствах, эффект демпфирования не зависит от частоты).

Следует отметить, что возникновение автоколебаний в процессе точения зависит и от упругопластических свойств металла срезаемого слоя как в зоне пластической деформации, так и в зоне контактного взаимодействия сходящей стружки с передней поверхностью инструмента, которые определяют характер образующейся при резании стружки и оказывают существенное влияние на состояние упругой динамической системы.

Одним из наиболее эффективных методов, позволяющих изменить условия деформации металла при резании, является нанесение предварительного локального лазерного воздействия (ЛЛВ) на внешнюю поверхность срезаемого слоя. Сущность локального лазерного воздействия состоит в нагреве поверхностного участка стальной заготовки выше температуры фазового перехода $Ac3$ последующим охлаждением для получения высокой твердости в обработанной зоне (рис. 1).

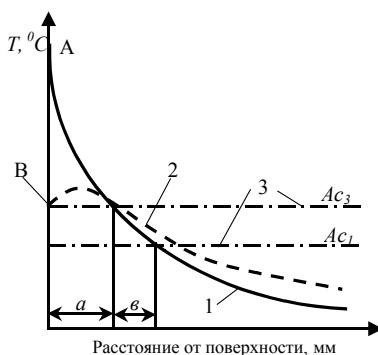


Рис. 1. Изменение температуры по сечению локального физического воздействия: 1 – в момент нагрева; 2 – через заданный промежуток времени после окончания обработки

В результате структура закаленной зоны состоит из мартенсита, а переходной зоны из мартенсита и феррита, так как ее охлаждение происходит из промежуточного температурного интервала $Ac3 - Ac1$. Более глубокие слои металла нагреваются до температуры ниже критической, поэтому изменения структуры в них не происходит. Линии 3 показывают температуры критических точек $Ac1$ и $Ac3$. Слой b , нагретый выше критической точки $Ac3$ получит полную закалку, а слой a , нагретый выше точки $Ac1$, но ниже точки $Ac3$, получит неполную закалку. Часть слоя a , наиболее близко примыкающего к поверхности, получит нагрев,

превышающий точку A_{c3} , т. е. получит определенную степень перегрева. Это определится в первую очередь высотой по температурной шкале точки A . Таким образом, структура локальной зоны будет характеризоваться наличием закаленного слоя с определенной степенью перегрева и переходного слоя с неполной закалкой. При прекращении лазерного воздействия произойдет перераспределение температуры из зоны локального воздействия за счет теплопроводности в глубь основного материала заготовки в соответствии с линией 2.

Ввиду локальности лазерного воздействия охлаждение нагретой области происходит самой внутренней массой металла. Глубина зоны лазерного влияния при достаточно интенсивном нагреве определяется распределением температур по сечению заготовки, что может быть регулируемо с разной степенью точности.

Локальная метастабильность создается в области предполагаемого припуска срезаемого слоя материала на внешней поверхности заготовки по специально заданной траектории точкой C (рис. 2), которая на этапе подготовки формируется частотой вращения заготовки и подачей устройства для создания ЛЛВ.

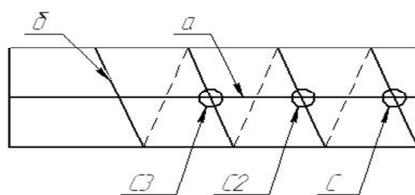


Рис. 2. Схема создания локальной метастабильности в обрабатываемом материале (а) и процесс точения заготовки после предварительного термического воздействия на материал (б)

Подвергая обрабатываемый материал локальному предварительному лазерному воздействию, а затем, осуществляя срезание этого поверхностного слоя, необходимо обеспечить большую глубину резания, чем глубина самого воздействия. Несоблюдение этого условия приведет к двум нежелательным последствиям: во-первых, обработанная поверхность будет иметь локальные зоны с другими физико-механическими свойствами, нежели материал заготовки, что отрицательно скажется на эксплуатационных свойствах детали; во-вторых, при обработке резко

снизится период стойкости резца, так как его вершина будет подвержена периодическим ударам.

В лабораторно-экспериментальном комплексе кафедры машиностроения проведены экспериментальные исследования, которые позволили получить необходимые данные для обеспечения динамической устойчивостью процесса резания при локальном лазерном воздействии на обрабатываемый материал (рис. 4).

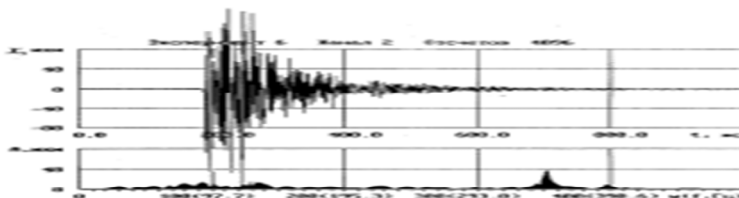


Рис. 3. Свободные колебания для подсистемы инструмент в направлении X

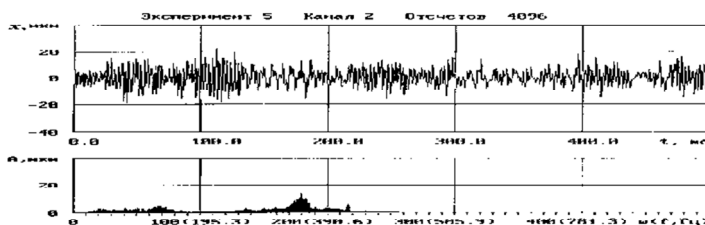


Рис. 4. Экспериментальные виброперемещения X по нормали к обрабатываемой поверхности для подсистемы инструмент при лезвийной обработке заготовки из стали 45 на станке мод.1К62: $V = 75$ м/мин, $S = 0,21$ мм/об, $b_c = 7$ мм, предварительно подготовленной методом лазерного воздействия

При лазерном воздействии в области предполагаемого припуска срезаемого слоя температурный источник приводит к изменению в локальной зоне механических свойств и остаточных напряжений, искажению кристаллической решетки, что приводит в процессе обработки при пересечении плоскости резания с зоной локального лазерного воздействия к мгновенному изменению напряженно-деформированного состояния,

подавлению автоколебательного процесса технологической системы и улучшению качества обработанной поверхности.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МАТЕРИАЛА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

В. И. Миронов, О. А. Лукашук

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Выполнен анализ процесса деформирования системы «машина – модельный образец» методом теории катастроф при разных граничных условиях. Выявлен нелокальный характер критериев разрушения и взаимосвязь статических и циклических свойств модельного материала.

Deformation of the “machine – model sample” system are analyzed using catastrophe theory for various boundary conditions. Nonlocal character of fracture criteria and correlation between static and cyclic properties of the model material are established.

подавляющее большинство работ по проблеме разрушения материалов и конструкций выполняются в развитие и обоснование энергетической концепции Гриффитса. Несмотря на то, что решения задач механики трещин, полученные в рамках моделей упругопластического анализа, не корректны. Более перспективным для решения проблемы разрушения представляется феноменологический подход механики разупрочняющихся материалов [1]. Построение теории ведется здесь в традиционном для механики ключе и начинается с выделения нового свойства материала, а именно стадии деформационного разупрочнения.

Указанная стадия реализуется в виде падающей ветви на машинной диаграмме в простых испытаниях на растяжение или кручение однократных образцов в достаточно жесткой испытательной машине [2]. Полные диаграммы деформирования (ПДД) с падающей до нуля ветвью построены для материалов разных классов.

Известно, что эффективно управлять свойствами материала можно путем изменения его структуры. В этой связи важно выяснить, каким образом микроструктура материала влияет на сопротивление разрушению, почему и когда оно снижается у высокопрочных сталей, каким должен быть материал для живучих конструкций.

На качественном уровне ответы на поставленные вопросы можно получить, используя простую структурную модель материала для описания стадии разупрочнения. Деформационное разупрочнение характерно для структурно-неоднородного материала, обусловлено процессами структурного уровня, а на макроуровне проявляется в снижении

несущей способности элемента материала при активном нагружении. Таким образом, сама физическая суть явления определяет необходимость использования для его моделирования структурно-феноменологического подхода.

Имея целью проведение качественного анализа процесса разупрочнения, примем достаточно жесткие ограничения на свойства элементов модельного образца:

1) элементы, диаметры которых d_0 малы по сравнению с их длиной l_0 , плотно упакованы в пучок, моделирующий макроэлемент материала, и в процессе деформирования касаются друг друга без надавливания;

2) необратимые деформации стержней пренебрежимо малы (хрупкое разрушение в точке с координатами (ε_Z, ξ_B) на рис. 1, а), а две части разрушенного стержня упруго разгружаются и «раздвигают без надавливания» уцелевшие стержни, образуя пору;

3) модули упругости E и коэффициенты поперечной деформации ν всех стержней одинаковы; прочностные свойства определяются плотностью распределения пределов прочности $f(\xi_B)$, заданной в интервале $[S_1, S_2]$ (на рис. 1, б приведена плотность равномерного закона распределения ξ_B);

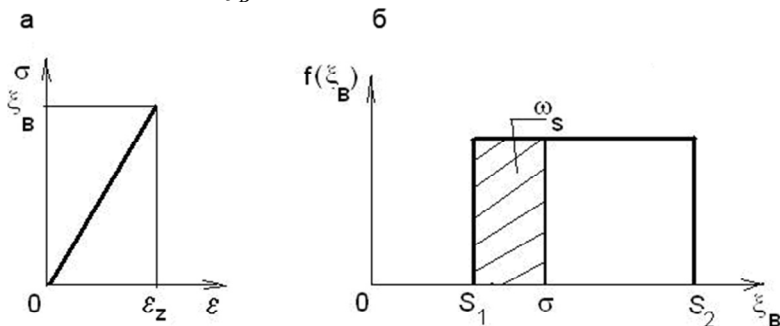


Рисунок 1

а – диаграмма деформирования элемента;

б – плотность распределения пределов прочности элементов

Добавим еще, что принятые условия растяжения модельного образца предполагают однородность поля перемещений уцелевших элементов. Тогда среднее напряжение в образце равно

$$\sigma = \{E\varepsilon, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{Z1}; \quad E\varepsilon(1 - \omega_S), \quad \varepsilon_{Z1} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{Z2}\}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{z1} = S_1 E^{-1}$; $\varepsilon_{z2} = S_2 E^{-1}$; $\omega_s = \int_{S_1}^{\sigma} f(\xi_B) dS$ — объемная доля

разрушенных стержней, определяемая в соответствии с первым ограничением.

Конкретный вид нелинейного участка функции (1) устанавливается заданием плотности $f(\xi_B)$. Но в любом случае диаграмма $\sigma(\varepsilon)$ имеет как восходящую, так и падающую до нуля ветвь. Например, в соответствии со вторым ограничением при равномерном законе распределения пределов прочности стержней $R(S_1, S_2)$ имеем

$$\sigma = \left\{ E\varepsilon, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{z1}; \quad E\varepsilon(S_2 - E\varepsilon)(S_2 - S_1)^{-1}, \quad \varepsilon_{z1} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{z2} \right\} \quad (2)$$

Диаграмма растяжения образца из материала, отвечающего нелинейному участку модели (2), в координатах $Q = \sigma A_0$, $v = \varepsilon l_0$ (где A_0 , l_0 — начальные площадь поперечного сечения и длина образца) имеет вид

$$Q = av - bv^2, \quad (3)$$

где $a = A_0 E l_0^{-1} S_2 (S_2 - S_1)^{-1}$; $b = A_0 E^2 l_0^{-2} (S_2 - S_1)^{-1}$. Приведенное выражение используется далее для анализа поведения системы «машина — модельный образец» в испытаниях на одноосное растяжение.

Вопросы устойчивости процесса деформирования образца в испытательной машине ранее рассматривались с позиций теории катастроф [3]. Катастрофами называются скачкообразные изменения, возникающие в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий. Исследование равновесных состояний системы «машина — модельный образец» дополнительно выявляет роль структурной неоднородности в обеспечении условий устойчивого деформирования.

На рис. 2, а испытательная машина изображена в виде упругой пружины эквивалентной жесткости. Скачкообразное (катастрофическое) изменение параметров состояния системы «машина — образец (u и v , или v)» при монотонном изменении параметров управления (p или u) связывается с частичным или полным разрушением образца. Теория катастроф объяснила зависимость наблюдаемых в эксперименте форм неустойчивости от числа управляющих параметров. При одном управляющем параметре поверхность состояний равновесия системы образует складку (рис. 2, б; 2, в).

В случае мягкого нагружения силой p полная энергия системы машина-образец определится выражением

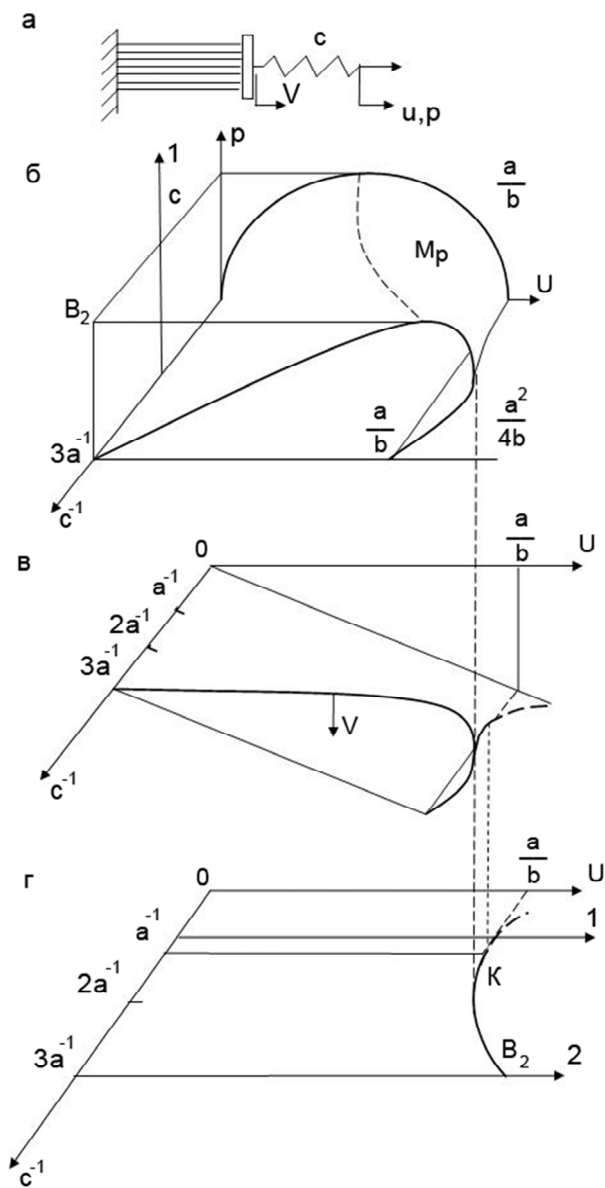


Рис. 2. Катастрофа складки системы «машина – образец»

$$\Pi = \int_0^v Q dv + \frac{c}{2}(u-v)^2 - \int_0^u p du. \quad (4)$$

Здесь первое слагаемое – энергия деформации образца, второе – потенциальная энергия нагружающего устройства, третье – работа внешней силы p , взятая со знаком минус. Все положения равновесия системы определяются выражениями

$$\frac{\partial \Pi}{\partial v} = Q - c(u - v) = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial u} = c(u - v) - p = 0, \quad (5)$$

Совокупность критических точек (v, u, c, p) функции Π (решений уравнений (5)) образует многообразие катастрофы, представленное поверхностью M_P на рис. 2, б. На поверхности выделены вырожденные критические точки (штриховая линия), которые делят ее на области устойчивых и неустойчивых равновесных состояний. Проекция штриховой линии в пространстве $\{p, c\}$ представлена прямой критических точек системы B_2 , параллельной горизонтальной оси c^{-1}

$$p = p(v_1) = Q_{\max}, \quad (6)$$

где $v_1 = v_B$.

Любой путь нагружения (прямая 1 на рис. 2, б) независимо от жесткости машины пересекает бифуркационную прямую B_2 при $Q = Q_{\max}$, где система теряет устойчивость деформирования. Состояния материала, отвечающие падающей ветви функции (2), при мягком нагружении не реализуются.

Иначе выглядит бифуркационная картина при жестком нагружении заданным перемещением u подвижного захвата машины (рис. 2, в; 2, г). В этом случае бифуркационная кривая B_2 в пространстве управления $\{u, c\}$ (рис. 2, г)

$$u = \frac{(a + c)^2}{4bc}$$

имеет экстремум в точке $c = a$, которая разделяет области устойчивого и неустойчивого деформирования системы «машина – образец». Если выполнено условие $c > a$, то для образца из материала (2) можно построить на машинной диаграмме падающую до нуля ветвь (путь 1 на рис. 2, г). Произойдет равновесное, без динамики, разделение образца на две части. И наоборот, при недостаточной жесткости нагружающего устройства, путь деформирования системы (путь 2 на рис. 2, г) неизбежно пересечет линию B_2 , где произойдет потеря устойчивости систе-

мы, связанная с динамическим разрушением образца. В момент разрушения образца удлинение v_* равно

$$v_* = \frac{a + c}{2b} = v_B + \frac{c(S_2 - S_1)l_0^2}{2A_0E^2}, \quad (7)$$

где v_B – удлинение образца на пределе прочности материала. В случае кинематического нагружения образца $v_* = v_B$ только при бесконечно малой жесткости машины, или идеально однородном материале, когда $S_2 = S_1$. Для структурно неоднородных конструкционных материалов $v_* > v_B$ и, следовательно, реализуется падающая ветвь на машинной диаграмме. Положим $v_* = v_p = a/b$ ($v_p = 2v_B$) и найдем жесткость

$$c_* = \frac{A_0ES_2}{l_o(S_2 - S_1)}, \quad (8)$$

необходимую для построения диаграммы с падающей до нуля ветвью. Чем меньше жесткость образца A_0E/l_0 и чем выше неоднородность материала, оцениваемая разностью $(S_2 - S_1)$, тем меньше жесткость c_* машины, требуемая для построения падающей ветви диаграммы растяжения, что вытекает из выражения (8). Из формулы (7) следует, что чем однороднее по структуре материал, тем больше вероятность динамического разрушения образца, то есть тем хуже сопротивление разрушению. Заметим также, что чем меньше разность $(S_2 - S_1)$, тем круче падающая ветвь на диаграмме (3). В испытаниях реальных конструкционных материалов установлена тесная корреляционная связь между наибольшим углом наклона падающей ветви ПДД и трещиностойкостью материала [4].

Принимая гипотезу макроскопической определенности, все результаты исследования системы «машина – образец» следует отнести к конструкционному материалу. Такой переход позволяет считать разупрочнение неотъемлемым свойством материала, реализация которого в элементе конструкции зависит от его геометрии и от структурной неоднородности материала, определяющей условия равновесного деформирования.

Одно из практически важных направлений использования метода полных диаграмм связано с описанием разрушения, протяженного во времени. Изменение параметров статической диаграммы вследствие эксплуатационной поврежденности структуры материала приводит к изменению бифуркационной картины исследуемой системы «машина – образец».

Пусть $\omega_\eta = \int_{N_\alpha}^n f(\xi_\eta) dn$ – объемная доля разрушенных

от усталости стержней, определяемая в соответствии с четвертым ограничением. Тогда для семейства циклических диаграмм деформирования, параметризованного усталостной поврежденностью ω_η , вместо выражения (3) имеем

$$Q = (1 - \omega_\eta)(av - bv^2).$$

Анализ поведения системы машина-образец проводится аналогично и вместо выражения (6) дает

$$p = p(v_1) = (1 - \omega_\eta) Q_{\max}.$$

При циклической нагрузке постоянного уровня $p_m = \text{const}$ разрушение произойдет при снижении до него линии B_2 (рис. 2, б).

В случае контроля максимального перемещения цикла $u_m = \text{const}$ выражение бифуркационной кривой B_2 в пространстве управления $\{u, c\}$ принимает вид

$$u = \frac{a}{2b} + \frac{(1 - \omega_\eta)a^2}{4bc} + \frac{c}{(1 - \omega_\eta)4b}.$$

Кривая бифуркаций B_2 , которая разделяет области устойчивого и неустойчивого деформирования системы машина-образец после циклической тренировки, имеет теперь экстремум в точке с координатой (рис. 3)

$$c = (1 - \omega_\eta)a.$$

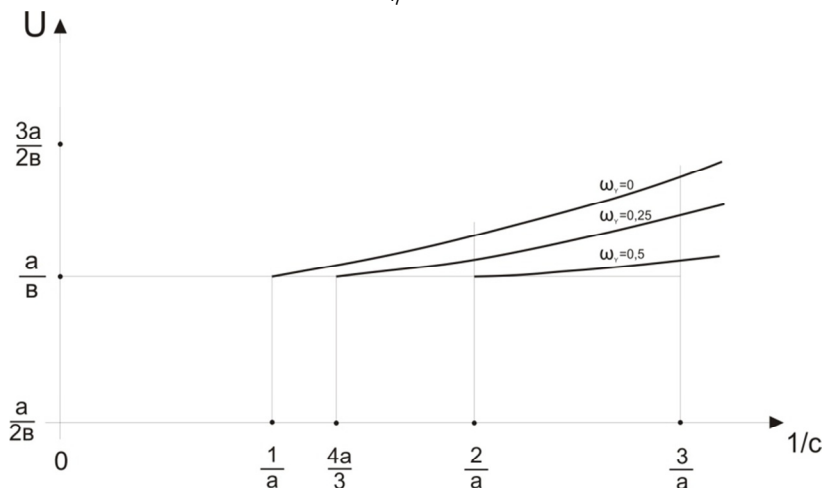


Рис. 3. Бифуркационные множества системы машина-образец в пространстве управления при циклическом нагружении

С ростом циклической наработки бифуркационное множество смещается в область меньших жесткостей. Увеличение перемещения по некоторому пути 1 на рис. 3 при испытании нетренированного образца приведет к динамическому разрушению, так как не выполнено условие устойчивости $c \geq a$. При $\omega_\eta = 0,5$ динамический скачок исчезает и становится возможным построение в гипотетическом эксперименте падающего участка машинной диаграммы.

Таким образом, в основу проведенного анализа, как в случае квазистатического растяжения, так и в случае циклического нагружения, положен единый подход. Несмотря на разницу сюжетов протекания усталостного процесса, окончательное разрушение образца происходит при потере устойчивости системы «машина – образец». Тем самым неустойчивость деформирования определяется как единая причина статического и циклического разрушения образца. Различны только условия ее проявления. Если при статическом нагружении система приближается к катастрофе, то при циклическом движется катастрофа, надвигаясь или уходя с пути нагружения, как в приведенном примере.

Циклическая деградация, рассмотренная в примере с модельным образцом, выявлена и в испытаниях с построением ПДД циклически тренированных образцов ряда конструкционных материалов [5]. Получено новое феноменологическое представление об усталостном процессе и способ нахождения его параметров. Зависимость параметров ПДД от различных факторов, связанных с эксплуатацией конструкций, дает единую методологическую базу для исследования их влияния на ресурс изделий.

Выводы

Компьютерное моделирование с использованием обсчитываемой модели материала и аппарата теории катастроф позволяет наглядно показать взаимосвязанное влияние на характер разрушения собственно свойств материала и условий нагружения.

Структурная неоднородность определяет синергетические свойства материала и возможность равновесного деформирования на стадии разупрочнения. Среди условий нагружения решающее значение имеет жесткость системы нагружения, передающей нагрузку в очаг разрушения, определяемая геометрией детали.

Представление разрушения как потери устойчивости процесса деформирования приводит к новому пониманию предельного состояния материала и делает бессмысленным поиск «истинного» критического напряжения, как физической константы разрушения.

При корректной постановке эксперимента стадия разупрочнения, выраженная падающей ветвью диаграммы деформирования, может быть зафиксирована и у реального конструкционного материала.

Нелокальные критерии статического и усталостного разрушения материала имеют одинаковую природу и прямо зависят от его структурной неоднородности, от которой, в свою очередь, зависят условия устойчивости процесса деформирования.

-
1. *Волков С. Д.* Функция сопротивления материалов и постановка краевых задач механики разрушения. Свердловск: УНЦ АН СССР. Ин-т металлургии. 1986. 65 с.
 2. А.С.Г. 01 N 3/08 Устройство и способ для испытания образцов материалов на растяжение / В. И. Миронов, В. А. Андронов, А. В. Якушев, В. Б. Бамбулевич: заявл. 09.10.2003; опубл. 10.05.2005. Бюл. № 13-2005.
 3. *Маркочев В. М.* Теория катастроф и механика разрушения // Проблемы прочности. 1985. № 7. С.43–46.
 4. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов. Киев: ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины. 2004. 133 с.
 5. *Емельянов И. Г., Миронов В. И.* Долговечность оболочечных конструкций. Екатеринбург: РИО УрО РАН. 2012. 217 с.

ГЛАДКОЕ СОПРЯЖЕНИЕ ДВУХ ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ПЛОСКОСТЕЙ, ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ

Н. Е. Мисюра, Т. В. Штанг, Е. А. Митюшов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Рассмотрен метод гладкого сопряжения двух пересекающихся плоскостей произвольно ориентированных в пространстве на примере горизонтальной и наклонной плоскостей. Тестирование метода выполнялось в пакете символьной математики MathCad 14. Гладкое сопряжение осуществлялось при помощи векторного полинома пятой степени при выполнении краевых условий.

The method of smooth conjugation of two intersecting planes arbitrarily oriented in space is considered on the example of horizontal and sloping planes. The method testing is performed in symbolic mathematics package MathCad 14. The smooth conjugation is carried out by vector polynomial of the fifth degree under boundary conditions.

Многообразие форм аналитических поверхностей [1, 2] позволяет решать различные задачи геометрического моделирования в графическом дизайне [3], архитектурно-строительной сфере [4–7], судостроении и авиастроении [8–11], машиностроении [12], а также во многих других отраслях, где возникают задачи формообразования и оптимизации геометрических структур по эстетическим, технологическим или конструктивным признакам. Расширению возможности аналитических методов в задачах формообразования может способствовать гладкое сопряжение поверхностей, при котором, будучи заданные разными аналитическими выражениями, ее элементы воспринимаются как единое целое (по сути таковым являющееся, в силу удовлетворения специальных краевых условий, обеспечивающих нужную гладкость). Кроме того, гладкое сопряжение в качестве инструмента сглаживания между несоединенными поверхностями (или скругления постоянного/переменного радиуса между поверхностями, имеющими общую кромку) эффективно применяется в CAD-системах.

Алгоритм гладкого сопряжения при разработке системы геометрического моделирования машиностроительных деталей на базе использования метода Безье для представления кривых и поверхностей в параметрическом виде рассмотрен в работе [13]. Базовые критерии оценки качества функциональных поверхностей и схема моделирования кривой высокого качества на множестве геометрически аналитических кривых

разрабатывались в работе [14]. В данной работе на примере гладкого сопряжения двух пересекающихся плоскостей произвольно ориентированных в пространстве рассматривается метод гладкого сопряжения аналитических поверхностей.

Пусть в прямоугольной декартовой системе координат заданы в векторной форме две плоскости S_1 и S_2 своими нормальными единичными векторами \vec{n}_1 , \vec{n}_2 и радиус-векторами \vec{r}_1 , \vec{r}_2 фиксированных точек M_1 и M_2

$$\begin{cases} S_1 : (\vec{r} - \vec{r}_1) \cdot \vec{n}_1 = 0, \\ S_2 : (\vec{r} - \vec{r}_2) \cdot \vec{n}_2 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Если направляющие векторы неколлинеарны, то плоскости пересекаются. Уравнение линии пересечения плоскостей L ищется в виде

$$\vec{r} = \vec{r}_3 + t(\vec{n}_1 \times \vec{n}_2), \quad \text{или} \quad \vec{r} = \vec{r}_3 + t\vec{l}, \quad (2)$$

где \vec{r}_3 – радиус-вектор точки на прямой L , $\vec{l} = \vec{n}_1 \times \vec{n}_2$ – единичный вектор этой прямой.

Точку линии пересечения плоскостей можно найти из решения системы уравнений (2) или непосредственно по формуле

$$\vec{r}_3 = \vec{r}_1 + \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \cdot \vec{n}_2}{[\vec{n}_1 \times (\vec{n}_1 \times \vec{n}_2)] \cdot \vec{n}_2} [\vec{n}_1 \times (\vec{n}_1 \times \vec{n}_2)], \quad (3)$$

Так как $[\vec{n}_1 \times (\vec{n}_1 \times \vec{n}_2)] \cdot \vec{n}_2 = (\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2)^2 - \vec{n}_1^2 \vec{n}_2^2$ (по правилу вычисления двойного векторного произведения), то

$$\vec{r}_3 = \vec{r}_1 + \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \cdot \vec{n}_2}{(\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2)^2 - 1} [\vec{n}_1 \times (\vec{n}_1 \times \vec{n}_2)]. \quad (4)$$

и уравнение линии пересечения имеет вид

$$\vec{r} = \vec{r}_1 + \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \cdot \vec{n}_2}{(\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2)^2 - 1} [\vec{n}_1 \times (\vec{n}_1 \times \vec{n}_2)] + t(\vec{n}_1 \times \vec{n}_2) \quad (5)$$

При этом знаменатель $(\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2)^2 - 1$ обращается в ноль, когда плоскости параллельны.

Угол между плоскостями определяется равенством

$$\varphi = \arccos(\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2) \quad (6)$$

Уравнение прямых L_1 и L_2 , лежащих в заданных плоскостях перпендикулярно их линии пересечения задаются уравнениями

$$\begin{aligned} L_1: \quad \vec{r} &= \vec{r}_3 + t(\vec{l} \times \vec{n}_1), \\ L_2: \quad \vec{r} &= \vec{r}_3 + t(\vec{n}_2 \times \vec{l}) \end{aligned} \quad (7)$$

Для гладкого сопряжения плоскостей сначала на прямых L_1 и L_2 выбираются краевые точки на расстояниях d_1 и d_2 от линии пересечения плоскостей. Их положение при этом определяется равенствами

$$\begin{aligned} \vec{r}^{(1)} &= \vec{r}_3 + d_1(\vec{l} \times \vec{n}_1), \\ \vec{r}^{(2)} &= \vec{r}_3 + d_2(\vec{n}_2 \times \vec{l}) \end{aligned} \quad (8)$$

Далее выполняется гладкое сопряжение прямых L_1 и L_2 с помощью векторного полинома

$$\vec{r} = \vec{a}u^5 + \vec{b}u^4 + \vec{c}u^3 + \vec{d}u^2 + \vec{e}u + \vec{f}, u \in [0,1], \quad (9)$$

векторные коэффициенты которого определяются из краевых условий

$$\vec{r}(u)\Big|_{u=0} = \vec{r}^{(1)}, \quad \frac{d\vec{r}(u)}{du}\Big|_{u=0} = \frac{\vec{r}_3 - \vec{r}^{(1)}}{|\vec{r}_3 - \vec{r}^{(1)}|}, \quad \frac{d^2\vec{r}(u)}{du^2}\Big|_{u=0} = \vec{0}, \quad (10)$$

$$\vec{r}(u)\Big|_{u=1} = \vec{r}^{(2)}, \quad \frac{d\vec{r}(u)}{du}\Big|_{u=1} = \frac{\vec{r}^{(2)} - \vec{r}_3}{|\vec{r}^{(2)} - \vec{r}_3|}, \quad \frac{d^2\vec{r}(u)}{du^2}\Big|_{u=1} = \vec{0}. \quad (11)$$

Окончательно, поверхность, реализующая гладкое сопряжение плоскостей S_1 и S_2 , находится как поверхность переноса с образующей в виде полинома пятой степени (8) и направляющим вектором \vec{l}

$$\vec{r}(u, v) = \vec{a}u^5 + \vec{b}u^4 + \vec{c}u^3 + \vec{d}u^2 + \vec{e}u + \vec{f} + v\vec{l}. \quad (12)$$

В качестве примера рассматривается сопряжение горизонтальной и наклонной плоскостей, выполненное в пакете символьной математики MathCad (рис. 1) при следующих данных:

$$\vec{n}_1 = \{0, 0, 1\}, \quad \vec{n}_2 = \left\{0, -\sin \frac{\pi}{6}, \cos \frac{\pi}{6}\right\}, \quad \vec{r}_1 = \vec{r}_2 = \vec{r}_3 = \vec{0}, \quad d_1 = 1, \quad d_2 = 1$$

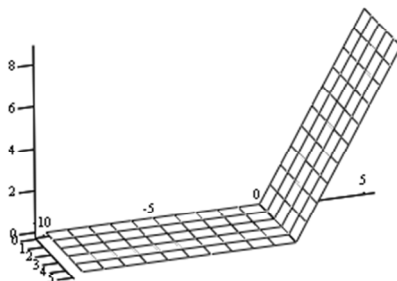


Рис. 1. Пример пересекающихся плоскостей

Применив рассмотренный алгоритм, получили поверхности, реализующие гладкое сопряжение горизонтальной и наклонной плоскостей. Результаты представлены на рис. 2.

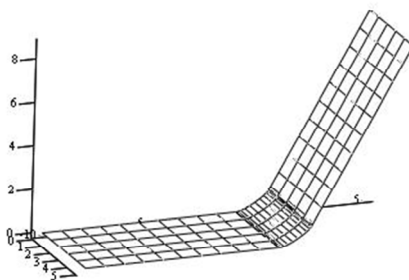


Рис. 2. Гладкое сопряжение пересекающихся плоскостей

Рассмотрен общий метод гладкого сопряжения двух пересекающихся плоскостей, реализуемый при помощи векторного полинома пятой степени при выполнении краевых условий специального вида. Метод иллюстрируется решением задачи гладкого сопряжения горизонтальной и наклонной плоскостей. Тестирование метода, выполненное в пакете символьной математики MathCad, демонстрирует адекватность предлагаемого подхода. В общей постановке метод может быть использован

при проектировании корпусных деталей в машиностроительном производстве, а также фасадных систем в строительной практике.

1. *Кривошапко С. Н., Иванов В. Н.* Энциклопедия аналитических поверхностей. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 560 с.
2. *Голованов Н. Н.* Геометрическое моделирование. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2002. 472 с.
3. *Nabiyev R. I., Ziatdinov R.* A mathematical design and evaluation of Bernstein-Bézier curves' shape features using the laws of technical aesthetics // *Mathematical Design & Technical Aesthetics*. 2014. Vol. 2, Nr 1. P. 6–13.
4. *Иванов В. Н., Наср Юнес Аббуши* Архитектура и конструирование оболочек в форме волнистых, зонтичных и каналовых поверхностей Иохимсталя // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2002. № 6. С. 21–24.
5. *Кривошапко С. Н., Иванов В. Н.* Классификация циклических поверхностей // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2006. № 2. С. 25–34.
6. *Иванов В. Н.* Архитектурные композиции на основе поверхностей Кунса // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2007. № 4. С. 5–10.
7. *Митюшов Е. А., Беязева З. В.* Геометрическое моделирование пространственных конструкций // *LAP Lambert Academic Publishing*, 2011. 134 p.
8. *Пашин В. М.* Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983. 296 с.
9. *Базилевский Ю. С.* Проектирование формы корпуса судна / Ю. С. Базилевский, Н. А. Вальдман, И. О. Мизин, Г. В. Савинов // *Судостроение*. № 1. 1996. С. 3–7.
10. *Карпов П. П.* Аналитическое описание судовых обводов // *Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта*. Вып. 46. Владивосток: ДВГТУ, 2006. С. 160–164.
11. *Битюков Ю. И., Калинин В. А., Токсанбаев М. С., Литвинов В. Б.* Создание модели поверхности вентиляторной лопатки для перспективного двигателя нового поколения // *Авиационная промышленность*. 2007. № 2. С. 7–11.
12. Рекомендации. САПР. Типовые методы геометрического моделирования объектов проектирования. Р 50-34-87 // М: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. Дата введения 01.01.1989. 113 с.
13. *Куреннов Д. В., Партин А. С.* Алгоритм гладкого сопряжения поверхностей // *Программные продукты и системы*. № 3. 2009. С. 62–64.

14. *Муфтыев В. Г., Марданов А. Р.* Изогеометрическое моделирование кривых линий и поверхностей высокого качества по базовым критериям плавности // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». Вып. 10 (153), Донецк: ДонНТУ, 2009. С. 131–145.

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

В. Д. Обоскалова, Е. Ю. Раскатов, А. Е. Волков
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Снижение веса вращающихся и перемещающихся возвратно – поступательно деталей двигателя позволяет увеличить максимальные обороты и, как следствие, повысить мощность авиационных и автомобильных двигателей, при этом снизит удельный расход топлива, а также вредных выделений. Производство конечной продукции из титана в настоящее время очень дорого и сложно. Данная методика предусматривает выпуск кованных плит, блоков и стержней из титана. Эти заготовки проходят обработку, и из них получают детали нужной формы. У данной технологии большая часть материала попадает в отходы, производственный процесс требует много времени и затрат. Новая технология дискового донного слива (ДДС) лишена этих минусов.

Weight reduction of rotating and moving parts of reciprocating engine can increase the maximum speed and as a result increase the capacity of aircraft and automobile engines, while reducing fuel consumption and harmful emissions. Production of the final titanium products is currently very expensive and difficult. This method includes the production of forged plates, blocks and rods made of titanium. Then these blanks are processed, and obtained details of the necessary form. With this technology, most of the material falls into the waste, the manufacturing process requires a lot of time and a lot of energy. New technology Disk bottom drain does not have these disadvantages.

Титан широко используется в самых разнообразных отраслях промышленности. На сегодняшний день хорошо освоены методы производства слитков из титановых сплавов. Одним из способов является переплав металла в промежуточной емкости метод гарнисаж – расходующий электрод (ГРЭ), он обеспечивает высокое качество продукции, но достаточно дорог и энергоемок. Другим известным методом для изготовления слитков является вакуумно-дуговой переплав (ВДП), который достаточно экономичен, но дальнейшая переработка в готовую продукцию приводит к большим потерям металла и энергозатратам.

Исходя из этого, была создана технология дискового донного слива (ДДС), которая позволила объединить в себе положительные стороны

вышеперечисленных технологий с более широкими возможностями изготовления продукции из титана.

Технология ДДС наиболее близка к широко известной технологии ГРЭ. Но сравнивая схемы устройств ГРЭ и ДДС, можно ответить основные отличия этих процессов. Для осуществления способа ГРЭ в промышленных печах имеется поворотный тигель для слива расплава в форму. Схема использует расходуемый электрод, в качестве которого служит гарнисаж от предыдущей плавки, который достигается из тигля, за счет поворота его на 90° . После того как расплав будет получен, его слив происходит за счет поворота тигля в кристаллизатор через направляющую воронку. На первой стадии в кристаллизатор попадает нагретая порция расплава, завершающая порция расплава имеет более низкую температуру, поэтому верхняя часть слитка быстро затвердевает. Соответственно, образуются фронты кристаллизации, направленные от наружных поверхностей слитка к его центру. Это приводит к тому, что в месте их схождения образуется пористость. Другими словами, данная схема заливки кристаллизатора не обеспечивает постоянную подпитку расплавом кристаллизующиеся объемы металла на всем протяжении слитка.

Схема устройства ДДС также использует гарнисаж. Слив расплава в кристаллизатор осуществляется за счет проплавления днища переплавляемого диска. При ДДС в кристаллизатор сначала попадает порция менее нагретого расплава, а уже потом более нагретая. Данная схема обеспечивает постоянную подпитку расплавом кристаллизующиеся объемы металла по всему сечению слитка.

Для реализации предложенного способа служит установка (рис. 1), которая состоит из верхней камеры 1, электрода 2, штока 3, привода 4, сферического кристаллизатора 5, гарнисажа 6, листа 7, цилиндрического кристаллизатора 8, рабочего кристаллизатора 9, соленоида 10 и корпуса 11.

На рис. 2 показана работа установки: на лист 7 насыпается шихта 12 (рис. 2, а), между электродом 2 и шихтой 12 загорается дуга 13 (рис. 2, б), которая образует расплав металла 14 (рис. 2, в). Электрод 2 постепенно сплавляется и уменьшается в диаметре, при этом дуга 13 концентрируется в центральной части (рис. 2, г), далее вся шихта 12 расплавляется, днище проплавляется и расплав сливается в кристаллизатор 8 (рис. 2, д). В момент заполнения кристаллизатора доплавляется остаток электрода 2 (рис. 2, е).

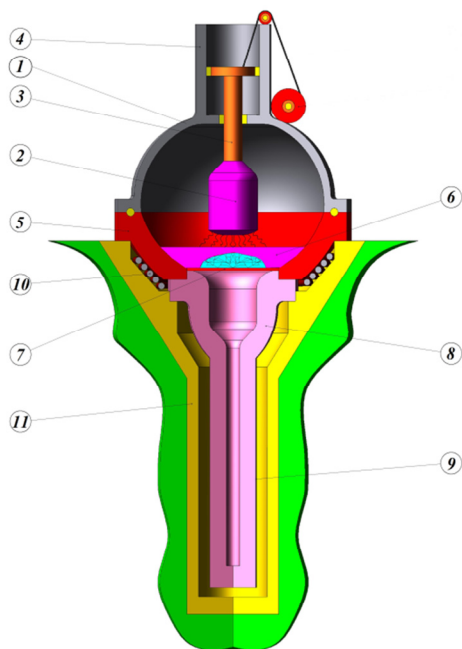
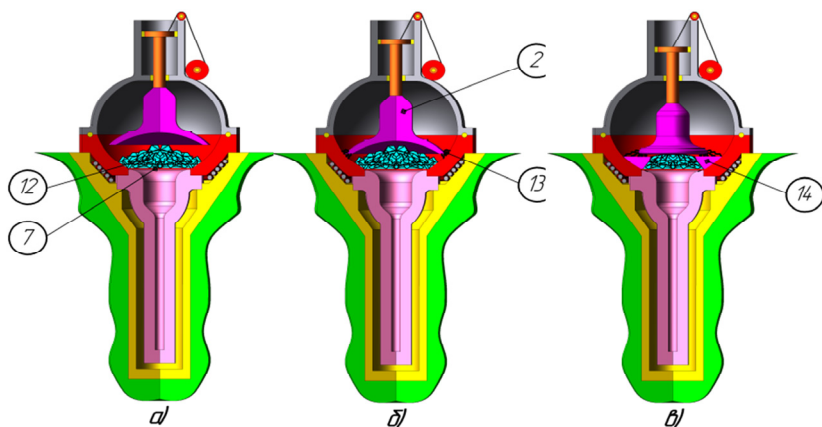


Рис. 1. Установка для реализации способа ДДС



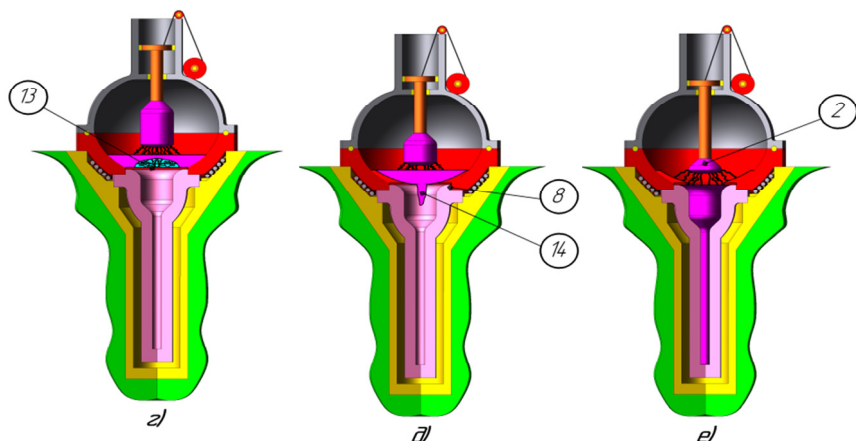


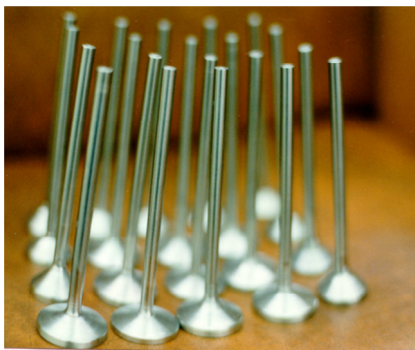
Рис. 2. Работа установки

Конструктивной особенностью установки ДДС является то, что кристаллизатор 5, в котором размещается гарнисаж имеет форму полушария или полусферы. За счет этого при плавлении шихты и электрода расплав скапливается на листе 7, при этом наибольший диаметр, который образует гарнисаж 6 всегда меньше максимального диаметра кристаллизатора 5. Следовательно, когда образованный гарнисаж переворачивают и приварив к штоку используют как электрод, то последний свободно входит в пространство кристаллизатора 5. Внутренняя полость верхней камеры 1 является зеркальным отображением геометрии внутренней полости кристаллизатора 5. Такая особенность позволяет свободно размещать электрод-гарнисаж во внутренней полости печи ДДС, при этом не используя лишнего пространства, что в свою очередь позволяет наиболее быстро и экономично создавать вакуум.

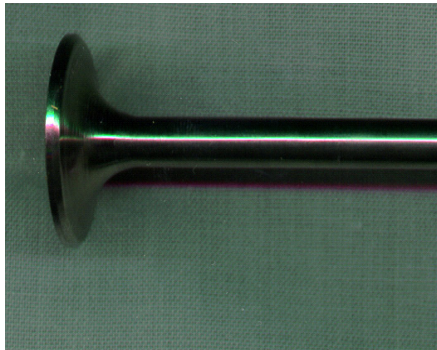
Для того чтобы верхняя камера свободно снималась и отводилась в сторону, открывая пространство для съема гарнисажа и слитка из кристаллизатора, она снабжена односторонним пневмоприводом 4, который может быть снабжен специальным тормозом. Иными словами, движение вниз обеспечивается за счет веса электрода и создания вакуума в полости пневмопривода. А для того чтобы движение было плавным, электрод удерживается тросом.

После производства слитка на печи ДДС ему не требуется поверхностная обточка, так как эта поверхность очень ровная и чистая.

В качестве примера на рис. 3 приведены поверхности изделий, полученные методом ДДС.



1



2



3



4

Рис. 3. Фасонные изделия, полученные на различных модификациях установок ДДС: 1 – автомобильные клапана из Fe-Ti-Nb; 2 – клапана из Ti-AlTi; 3 – шатун из Ti; 4 – тройники из Ti.

Технология ДДС имеет не только большую производительность и компактность, но и возможность производить сложную по конфигурации продукцию, включая производство плит, листов, фасонных изделий и т. п. Эта технология не требует особосложной системы управления, больших капиталовложений и производственных площадей.

Данное оборудование может найти свое применение в местах производства титановой губки и скопления титановых отходов, позволяя значительно снижать себестоимость титановой продукции. Кроме того, при освоении производства титана малыми предприятиями, а также в стра-

нах пока не имеющих титанового производства, технология ДДС может стать базовой.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ СКРАЙБИРОВАНИЯ ХРУПКОЙ ПЛАСТИНЫ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ПОКРЫТИЕМ

А. И. Огородников

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Построена вычислительная модель для компьютерного моделирования процессов механической обработки твердых материалов с функциональным покрытием. Для реализации модели в параметрическом виде написаны коды с использованием динамического языка программирования APDL многодисциплинарного комплекса CAE ANSYS. Разработанная модель применена к технологической операции разделения кремниевых пластин с отражающим покрытием из сульфида цинка, изучаемых в связи с возможным применением в оптоэлектронных приборах и топливных элементах. В серии вычислительных экспериментов хрупкая пластина с нанесенной на поверхность пленкой ZnS различной толщины подвергнута скрайбированию, проведен компьютерный анализ напряжений в зоне резания.

In this paper, finite-element simulation was done to investigate behavior of coated brittle plate under force loading. The parametric task of scratching the plate was solved using ANSYS Program Dynamic Language codes. Anti-reflecting ZnS coating on silicon wafer was scratched during simulation to analyze internal stresses under cutting tool tip. The scratching was considered as a special case of cutting.

Введение

В производственной и исследовательской практике полупроводниковой промышленности на поверхность пластин наносят риски, эта операция применяется для изучения поведения хрупких материалов [1] и для разделения кремниевых пластин [2]. При разработке технологий механической обработки новых материалов и выбора оптимальных параметров резания сложно структурированных хрупких материалов [3] пользуются результатами экспериментов по микро- и наносcrapанию. Скрайбирование, разделение, полировка и шлифовка являются основными технологическими операциями обработки не только для электроники, но также и для всего ряда оптических приборов и солнечных батарей. С уменьшением размера приборов и изделий одновременно растут требования к качеству обработки и ширине бездефектных зон после выполнения операция механической обработки [4].

Под действием силовой нагрузки кремний может испытывать упругое, пластическое, упруго-пластическое и хрупкое деформирование с последующим разрушением. Для получения поверхностей наилучшего качества в оптоэлектронике обычно используют пластический режим обработки. Кремний является твердым и хрупким материалом, поэтому реализация операций механического разделения пластин с готовыми приборами возможна в режиме хрупкого разрушения. При этом резание алмазным инструментом остается актуальным методом обработки монокристаллического кремния [5].

В конструкции изделий используется ряд покрытий, с помощью которых обеспечиваются функциональные свойства оптических компонентов приборов [6]. Например, покрытия широко применяются для улучшения производительности отражающих и абсорбирующих пленок оптоэлектроники [7]. Таким образом, не снижается спрос на новые прогрессивные методы бережной обработки хрупких оптических и полупроводниковых материалов, включая монокристаллы, керамики и стекла, с функциональными покрытиями различной толщины.

Вместе с тем целый ряд практических задач разделения хрупких пластин с покрытием остается нерешенным. Процесс разделения пластины обычно состоит из предварительного нанесения алмазным инструментом царапины на поверхности, а затем механического разделения. При нанесении риски ребром или гранью алмаза в пластине возникают напряжения. Поведение покрытия при этом изучено недостаточно. Целью данной статьи является разработка методики компьютерного моделирования процессов механической обработки хрупких материалов с функциональным покрытием.

Материалы и процессы

В данной работе покрытие из сульфида цинка (ZnS) было выбрано для реализации компьютерной модели и оценки внутренних напряжений вблизи поверхности кремниевой пластины при силовом воздействии алмазного инструмента. ZnS используется в анализируемом объекте как функциональное покрытие для регулирования интенсивности солнечного света в солнечных батареях или для обеспечения прозрачности при пропускании инфракрасного излучения в пределах оптического окна. Компьютерное моделирование пластин было проведено на конечно-элементной сетке (метод конечных элементов – МКЭ) при соответствующих технологическим параметрам условиях нагружения, чтобы оценить величину напряжений и глубину дефектной зоны при скрайбировании.

Процесс скрайбирования должен создавать минимальную дефектную зону вблизи риски и обеспечивать безопасное разделение пластины по линии риски. При этом сколы и внутренние трещины являются нежелательными дефектами. В вычислительных экспериментах риски на поверхность кремниевой пластины наносились коническим алмазным инструментом с внутренним углом 20–140 градусов. Приложенная нагрузка равнялась 0,01–1,00 Н. В соответствующей математической модели скрайбирование представлено как частный случай теории резания твердых материалов. Глубина резания, ширина риски и касательная компонента силы резания были определены из заранее заданной нормальной нагрузки, геометрии инструмента и свойств материала.

Специфика моделирования процессов резания заключается в комплексной зависимости от большого числа разных по физической природе факторов. Подробная теория резания разработана для пластически деформируемых металлов. Для оптических и полупроводниковых материалов не существует полной теории, которая рассматривает все особенности анизотропии, повышенной твердости и хрупкости, а также описывает повреждения без пластической деформации и зарождения зародышей дефектов вблизи покрытия.

Результаты моделирования

Быстро развивающиеся конечно-элементные программные комплексы позволяют в настоящее время осуществлять вычислительные эксперименты, создавать и исследовать объекты на сеточных моделях [8]. Анализ МКЭ используется для компьютерного моделирования как конструкции устройств, так и технологии изготовления изделий из кристаллов. Исследование и виртуальное нагружение сеточных моделей может помочь в поиске оптимальной геометрии режущего инструмента и параметров процесса резания. 3D-моделирование резания кремниевой пластины было сделано с использованием МКЭ. Для решения задачи параметрического моделирования процессов резания кремниевой пластины с функциональным покрытием были использованы коды APDL (параметрический динамический язык ANSYS) программного пакета ANSYS [9].

Первоначальная геометрия была создана и сконструирована с помощью препроцессора ANSYS, она состоит из кремниевой пластины, приклеенной нижней плоскостью к гибкой пленке, а также алмазного инструмента. Нагрузка и ограничения вычислительной модели включают ограничение вертикальных перемещений оси Z , примененное к нижней поверхности технологической пленки, и силу по оси Z , приложенную к верхней плоскости инструмента. Ось Z совпадает с направлением силы тяжести и нормальной силой, действующей на инструмент. Ось Y сов-

падает с линией риски. Выделен в сетке верхний слой пластины, предназначенный для анализа поведения покрытия и позволяющий задавать различные значения контактного сцепления. На рис. 1 представлена геометрия хрупкой пластины с покрытием и риской, а также конечно-элементной сетки вокруг риски в вертикальной плоскости симметрии.

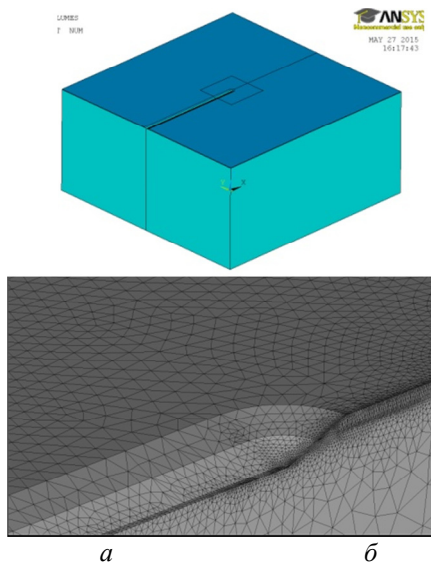


Рис. 1. Геометрия (а) и конечно-элементная сетка (б) пластины с покрытием и риской на поверхности

По результатам вычислительных экспериментов было определено падение напряжений в кремниевой пластине вдоль нормали к линии риски от вершины инструмента. На рис. 2 и рис. 3 показаны результаты моделирования. Поверхностный слой влияет на распределение напряжений в кремниевой пластине.

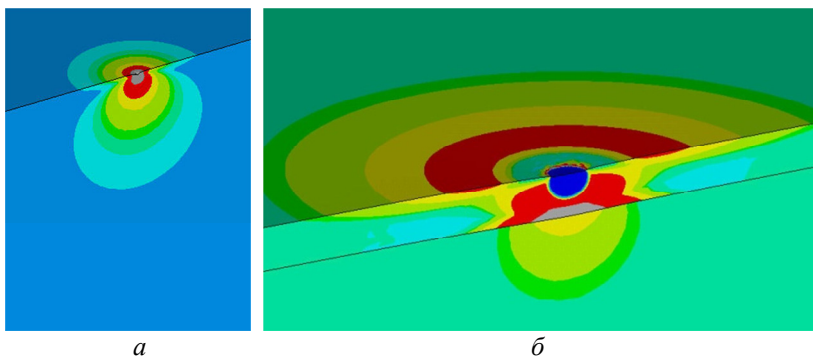


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений в кремниевой пластине без покрытия (*а*) и главное напряжение в пластине с функциональным покрытием толщиной 5 нм (*б*) под действием силовой нагрузки

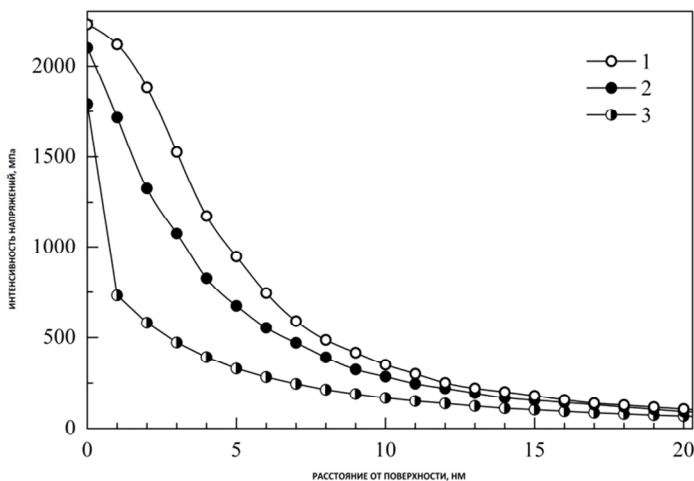


Рис. 3. Падение интенсивности напряжений в кремниевой пластине для толщины покрытия 1 мкм (1), 2 мкм (2), 5 мкм (3)

ZnS является сравнительно мягким материалом и в качестве покрытия снижает уровень внутренних напряжений в кремнии в процессе резания. Сжимающие напряжения сосредоточены в слое толщиной 5 мкм под действием силовой нагрузки 0,1 Н, при этом максимум растягивающих напряжений наблюдается непосредственно в кремнии. Разрабо-

танная вычислительная модель и верифицированная программа в кодах APDL позволяют моделировать не только кремниевые пластины, но и любые другие хрупкие материалы. Например, серебро является наиболее часто используемым металлом для нанесения покрытия на оптические стекла и для защиты хрупких пластин от коррозии.

Заключение

В данной работе выполнено объемное моделирование хрупкой пластины с тонкой пленкой на поверхности методом конечных элементов. Компьютерное моделирование может улучшить понимание проблем резания хрупких материалов с функциональными покрытиями и содействовать дальнейшему развитию существующих технологий разделения твердых пластин.

1. *Ogorodnikov A. I., Ogorodnikova O. M., Tikhonov I. N.* Simulation of defect zones in scribed silicon wafers // *Materials Science and Engineering: IOP Conf. Series*, 2010. Vol. 15. P. 012–046.

2. *Огородников А. И., Жуков Ю. Н., Тихонов Е. Е., Савиных К. М.* Лезвийный инструмент для разделительных операций хрупких листовых заготовок // *Вестн. машиностроения*. 2015. № 3. С. 413–416.

3. *Огородникова О. М.* О проблемах интеграции вычислительного материаловедения в цифровое машиностроение // *Информационные технологии в проектировании и производстве*, 2014. № 2. С. 30–34.

4. *Огородникова О. М., Панин О. А.* Компьютерное исследование компонентов микросистемной техники // *Нано- и микросистемная техника*. 2009. № 5. С. 12–14.

5. *Tian Y., Qiu M., Liu Z., Tian Z., Huang Y.* Discharge cutting technology for specific crystallographic planes of monocrystalline silicon // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2014. Vol. 27. P. 546–552.

6. *Awasthi S., Nautiyal B. B., Bandyopadhyay P. K.* Marine environment compatible antireflection coating with nanotop layer on silicon optics // *Infrared Physics & Technology*. 2014. Vol. 65. P. 113–116.

7. *Atkinson C., Sansom C. L., Almond H. J., Shaw C. P.* Coatings for concentrating solar systems // *A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 45. P. 113–122.

8. *Огородникова О. М.* Исследовательская функция программ CAE в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM // *Вестн. машиностроения*, 2012. № 1. С. 25–31.

9. *Огородникова О. М.* Введение в компьютерный конструкционный анализ. Екатеринбург: УрФУ, 2001.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ SIEMENS PLM SOFTWARE

О. М. Огородникова

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

В статье обсуждается применение программного обеспечения Siemens PLM Software для конструирования мехатроники и согласованного моделирования гибких производственных систем. Спроектирован робототехнический комплекс для неразрушающего контроля поверхности актуальных крупногабаритных литых деталей в составе литейного завода-автомата с использованием модулей NX CAD и Mechatronics Concept Designer. Пошагово приведен алгоритм проектирования, включая построение объемных геометрических моделей и управление движением роботов. Проект выполнен студентами Механико-машиностроительного института УрФУ в рамках исследовательской работы и представляет первый опыт подобного проектирования для предприятий Российской Федерации.

In this paper, an application of Siemens PLM Software for robotics designing and modeling is discussed. The robotics system for non-destructive testing of cast components as a part of automated foundry was designed using NX CAD and special Siemens module named Mechatronics Concept Designer. The project was made by students of Ural Federal University within the framework of research course. That was the first experience of such projection for industry in Russian Federation.

Введение

Современное высокотехнологичное машиностроение тесно связано с цифровым производством и использует постоянно усложняющееся программное обеспечение на всех этапах проектирования машин и предпроизводственной подготовки [1]. Становится очевидным, что в XXI в. роботы окажутся наиболее трудными и интересными объектами для проектирования и производства, что потребует творческого переосмысления индустрии машиностроения и информационной инфраструктуры проектирования [2]. Рынок робототехники находится на начальной стадии развития, поэтому на текущий момент отсутствуют общепринятые промышленные стандарты и идеальные концепции конструирования робототехнических систем. Вместе с тем роботы традиционно используются для автоматизации производства в машинострое-

нии. В ряде публикаций обсуждаются общие вопросы применения интегрированных систем CAD/CAE/CAM [3] для проектирования роботов. Эта быстро прогрессирующая область опытно-конструкторских и исследовательских работ включает концептуальное конструирование механизмов, симуляцию движений, инженерный анализ динамики и прочности [4], прототипирование и диагностику. В последнее время многие специалисты по робототехнике концентрируются на развитии биосовместимых роботов, включая антропидов. В этом направлении наиболее важными становятся вопросы управления и динамики роботов, искусственного интеллекта и взаимодействия с человеком [5].

В данной статье обсуждается уникальная практика применения студентами УрФУ программного обеспечения Siemens PLM Software для проектирования робототехнических комплексов.

Программное обеспечение и специфика проектирования роботов

При организации учебного процесса бакалавров и магистров по новому направлению «Мехатроника и робототехника» в УрФУ для проектирования и технологической подготовки изготовления роботов было выбрано программное обеспечение Siemens PLM Software. Выбранная среда проектирования CAD/CAE/CAM/PLM позволяет взаимосвязанно решать образовательные, исследовательские, опытно-конструкторские и технологические задачи. Немаловажным аргументом в пользу продуктов Siemens является возможность организовать обучение иностранных студентов и создать обучающие курсы на английском языке с полной конвертацией полученных знаний в современное машиностроительное производство в любой стране мира. Планируется также практическая реализация студенческих работ из проектной среды CAD/CAE/CAM Siemens за счет изготовления деталей роботов быстрым прототипированием или на станках с ЧПУ.

В адаптации и развитии интегрированных программных комплексов CAD/CAE/CAM/PLM применительно к конструированию механических узлов роботов следует выделить ряд актуальных задач, решение которых обеспечит быстрое и безошибочное выполнение всех этапов жизненного цикла. Перечислим эти задачи: 1) создание параметрической базы данных типовых механических узлов и деталей; 2) реализация быстрого объемного моделирования произвольных пространственных поверхностей; 3) конвертация модели 3D CAD во входные данные для инженерного анализа конструкции; 4) выделение параметров конструкции, обеспечивающих прочность и надежность в условиях эксплуатации; 5) симуляция кинематики движений и определение управляющих параметров; 6) оптимизация технологий и обеспечение минимальной

стоимости изготовления деталей робота. Siemens PLM Software имеет необходимые ресурсы для решения перечисленных задач.

Программное обеспечение Siemens представляет интерес для проектирования мехатроники благодаря возможности симулировать управление роботом и настраивать приводы. При этом первоочередные задачи, которые необходимо решить в программной среде, включают планирование управляемых контроллером движений, определение параметров движения, выбор и настройку контроллера, анализ программ и сигналов, использование средств сегментации и визуализации, настройку шаблона для траектории движения.

Дальнейшее развитие методологии проектирования робототехнических комплексов, включая гибкие производственные системы и взаимодействие роботов в системе, связано с использованием модулей Tecnomatix® в составе программной среды Siemens. В частности, программа Tecnomatix® RobCAD поддерживает конструирование, симуляцию, оптимизацию, инженерный анализ многокомпонентных роботизированных комплексов и программирование в автономном режиме автоматизированных технологических процессов с учетом производимой продукции и имеющихся ресурсов. Таким образом формируется платформа для параллельного инжинирнга с возможностью оптимизировать процессы и составлять циклограммы. В среде RobCAD имитируется полномасштабный макет производственных ячеек и систем.

Проектирование робототехнической системы в среде Mechatronics Concept Designer

Все спроектированные и запрограммированные движения роботов становятся понятными за счет применения средств визуализации 3D-Siemens, и эта функция важна при обучении студентов основам проектирования. На рис. 1 показан спроектированный студентами в среде Mechatronics Concept Designer (MCD) робототехнический комплекс для неразрушающего контроля крупногабаритных литых деталей в составе литейного завода-автомата. Программная среда позволяет проектировать и программировать перемещение деталей между ячейками производственной системы. Программный модуль Mechatronics Concept Designer базируется на платформе NX CAD и дает доступ ко всему необходимому инструментарию для конструирования механических узлов. Изготавливаемая в проекте гибкой производственной системой литая деталь вагонной тележки [6] является сложным объектом для объемного геометрического моделирования и технологического исполнения, она была предварительно построена также в Siemens NX CAD. Технологические проблемы серийного производства литых деталей вагонов [7] можно решить при переходе на качественно новый уровень организации

производственных процессов в рамках литейного завода-автомата. Ранее нами подробно были изучены технологические процессы изготовления обсуждаемых деталей [8] с использованием методов компьютерного моделирования [9] для реализованных в настоящее время производственных процессов [10].

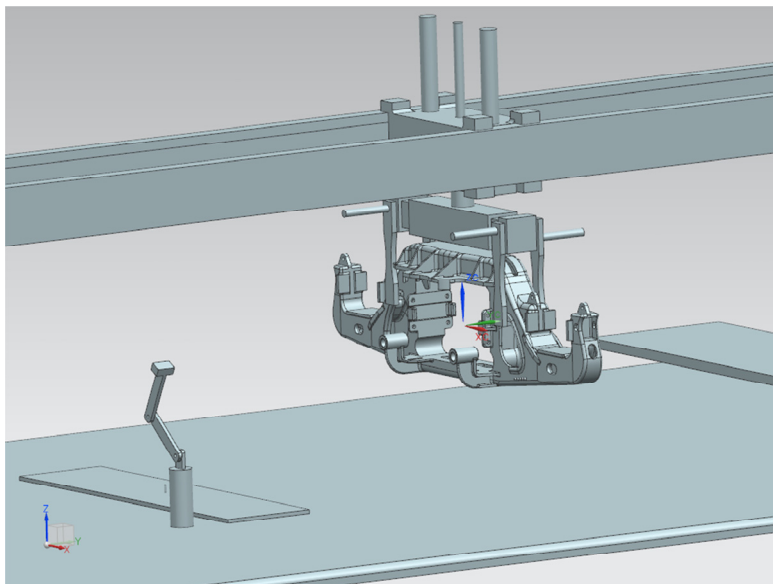


Рис. 1. Симуляция перемещения литой детали спроектированным комплексом на участок неразрушающего контроля литейного завода-автомата

Программа MCD автоматически определяет текущий статус роботов и связанных с ними объектов и разрешает при необходимости мгновенное перемещение робота к выделенному объекту. Этот режим можно использовать для анализа гибкой системы, в которой несколько роботов или инструментов двигаются, производя одновременные операции с выделенной деталью или сборкой. Библиотека стандартных логических блоков предоставляет готовые к использованию решения, включая счетчики, таймеры, планировщики, контроллеры, захваты и другие необходимые устройства. Эти доступные функции повышают эффективность проектирования за счет использования проверенных решений в рамках стандарта IEC 61131-3, разрешая инженеру сосредоточиться на

решении творческих задач. На рис. 2 показан рабочий момент неразрушающего контроля роботом поверхности литой детали.

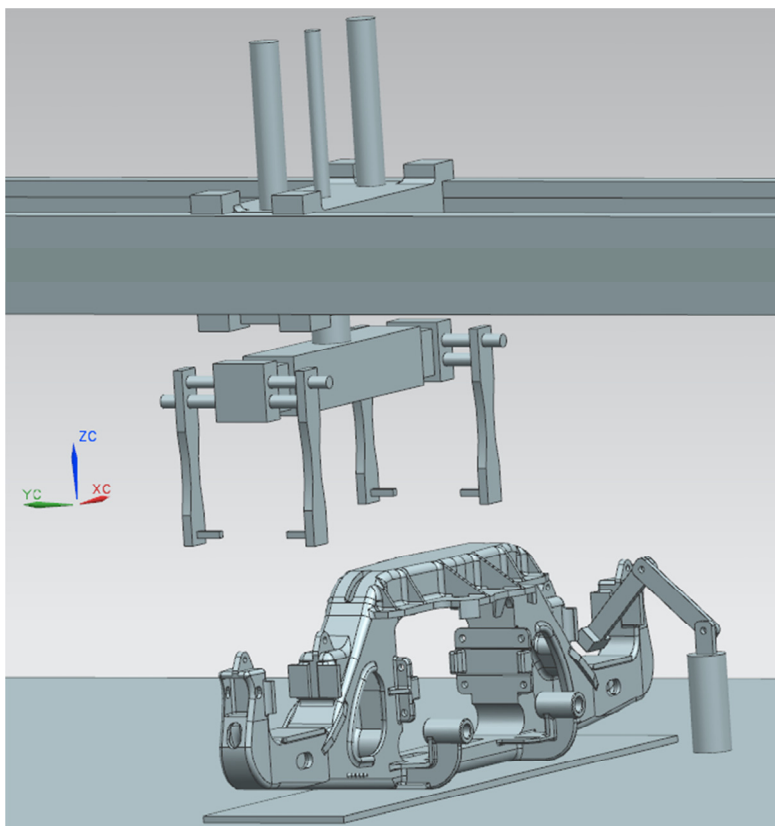


Рис. 2. Симуляция движений робота по поверхности литой детали при неразрушающем контроле

Проектирование робототехнических систем в программной среде Mechatronics Concept Designer осуществляется на базе функциональной модели (в российской терминологии по ГОСТ 2.052-2013 – электронной модели изделия). Проектирование последовательно проходит через этапы, подробно описанные в статье [11] со ссылкой на стандарты ЕСКД и кратко перечисленные далее.

1) Структурирование требований (составляется список требований и технических характеристик, формируется структура робототехнической системы, устанавливаются связи).

2) Создание функциональной модели (определяются основные составные части модели и общая компоновка, формулируется иерархическая структура, создаются возможные варианты исполнения).

3) Создание концепции механической части модели (определяется в общих чертах концепция объемной модели и упрощенный вариант конструктивного исполнения, выбираются конструктивные способы реализации движений, добавляется кинематика и динамика движений).

4) Назначение приводов и ограничений движения двух типов – по скорости и пространственному позиционированию.

5) Назначение последовательности выполнения операций и составление циклограммы (операции привязываются к соответствующим позициям функциональной модели, указывается последовательность и продолжительность включения двигателей и аппаратуры управления в циклах работы механизмов).

6) Добавление датчиков для предотвращения столкновений элементов системы.

7) Назначение операций, связанных с работой датчиков (определяются операции, вызванные срабатыванием датчиков, в дереве функциональной модели).

8) Детализация конструкции (подробно прорабатывается геометрия, узлы привязываются к соответствующим позициям дерева функциональной модели, добавляются болты, отверстия и т. п.).

9) Создание управляющей части модели (электро-, пневмо-, гидро-привод) с использованием датчиков и приводов, назначенных ранее.

10) Разработка управляющих программ (последовательность операций экспортируется из MCD в PLC Open XML, создаются коды PLC, настраиваются приводы).

Заключение

Алгоритм проектирования робототехнической системы с использованием модуля Mechatronics Concept Designer сформулирован и применен к созданию роботизированного участка неразрушающего контроля в составе литейного завода-автомата. Адаптация программного обеспечения Siemens PLM Software для конструирования мехатроники и подготовки производства в рамках учебных курсов и студенческих проектов является прогрессивной образовательной практикой в Уральском федеральном университете. В статье приведены иллюстрации из выпускной квалификационной работы бакалавра И. М. Проничева.

-
1. *Wu D., Rosen D.W., Wang L., Schaefer D.* Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation // *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 59. P. 1–14.
 2. *Gaudiello I., Lefort S., Zibetti E.* The ontological and functional status of robots: How firm our representations are? // *Computers in Human Behavior*. 2015. Vol. 50. P. 259–273.
 3. *Огородникова О. М.* Исследовательская функция программ САЕ в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM // *Вестн. машиностроения*. 2012. № 1. С. 25–31.
 4. *Огородникова О. М.* Введение в компьютерный конструкционный анализ. Екатеринбург: УрФУ, 2001. 47 с.
 5. *Matos V., Santos C. P.* Towards goal-directed biped locomotion: Combining CPGs and motion primitives // *Robotics and Autonomous Systems*. 2014. Vol. 62. P. 1669–1690.
 6. *Мартыненко С. В., Огородникова О. М., Грузман В. М.* Использование компьютерных методов для повышения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок // *Литейное производство*. 2009. № 11. С. 21–26.
 7. *Огородникова О. М., Мартыненко С. В.* Связанный анализ технологических процессов и нагруженных состояний литой детали // *Металлы*. 2012. № 5. С. 19–21.
 8. *Огородникова О. М., Пигина Е. В., Мартыненко С. В.* Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях // *Литейное производство*. 2007. № 2. С. 27–30.
 9. *Огородникова О. М., Мартыненко С. В., Грузман В. М.* Прогнозирование кристаллизационных трещин в стальных отливках // *Литейное производство*. 2008. № 10. С. 29–34.
 10. *Огородникова О. М.* Компьютерная диагностика дефектов и механических напряжений в литых деталях. // *Дефектоскопия*. 2011. Т. 47, № 8. С. 85–94.
 11. *Огородникова О. М., Ваганов К. А., Мушников Н. С., Юшков И. В.* Адаптация стандартов ЕСКД последней редакции для проектирования промышленных роботов в интегрированной программной среде // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2015. № 2. С. 49–55.

АНАЛИЗ РОССИЙСКИХ САЕ-СИСТЕМ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Я. А. Остапюк, В. С. Кузьмичев, Е. П. Филинов

Самарский государственный аэрокосмический университет
(Национальный исследовательский университет),
Самара

В статье рассмотрены специализированные российские САЕ-системы концептуального проектирования и инженерного анализа ГТД и ГТУ. Сравнение САЕ-систем проводилось по уровню используемых математических моделей и компьютерной реализации.

The article describes the specialized Russian CAE-system's conceptual design and engineering analysis of the gas turbine engines and the gas turbine plants. The comparison of the CAE-systems was performed in accordance with the operational level of mathematical models and computer implementation.

В настоящее время для концептуального проектирования и инженерного анализа авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок наземного применения (ГТУ) широко применяются различные САЕ-системы, которые можно разделить на две категории.

К первой категории относятся программные продукты, созданные на основе универсальных средств, такие как Dymola (основана на языке проектирования Modelica), Simulink (интегрирован в среду MATLAB), TRANSEO (основана на среде MATLAB), PROOSIS (основан на системе EcosimPro) и др., которые позволяют решать достаточно большой круг инженерных задач.

Ко второй категории относятся специализированные программные продукты, такие как DCOGEN, DVIGwT [1], EngineSim, GasTurb, Graphical Engine Cycle Analysis Tool (GECAT), Gas turbine Simulation Program (GSP), Numerical Propulsion System Simulation (NPSS), TERA, Uni_TTF, WebEngine, автоматизированная система термогазодинамического расчета и анализа ГТД и ЭУ (АСТРА) [2] и другие.

Отдельно стоит выделить программы, разработанные в конструкторских бюро (КБ) двигателестроительных предприятий для использования в рамках задач этих КБ. Их математические модели, как правило, максимально возможно учитывают особенности создаваемых фирмой двигателей и накопленный методический и экспериментальный опыт.

Стоит отметить, что разработка универсального инструмента для решения комплексных задач концептуального проектирования ГТД с использованием многоуровневого и междисциплинарного подхода является пока весьма сложной задачей.

Рассмотрим подробнее российские специализированные САЕ-системы концептуального проектирования и анализа ГТД, которые основаны на математическом моделировании.

Сравнение САЕ-систем проводилось по двум направлениям:

- уровень используемых математических моделей и функциональные возможности (табл. 1);
- компьютерная реализация (удобство интерфейса, интеллектуализация и т. д.).

Используемая математическая модель является основой, определяющей функциональные возможности САЕ-системы. Математическая модель базируется на ряде допущений, упрощений, следовательно, она не в полной мере тождественна объекту, а является его приближенным описанием. Методические допущения, используемые в большинстве отечественных САЕ-системах, упрощающие моделирование реальных процессов, протекающих в ГТД и ГТУ, описаны в работе [3].

Таблица 1

Сравнительный анализ САЕ-систем

Признак сравнения	САЕ-системы		
	DVIGwT, УГАТУ	Uni_TTF v.5.22, Лещенко И.А.	АСТРА v.7, СГАУ
1	2	3	4
Принцип построения схемы двигателя	Модульная декомпозиция	Универсальная схема ТРДД	Модульная декомпозиция, набор готовых схем
Область применения	Авиационные ГТД, ГТУ, ПТУ, ПГУ, гибридные ГТД, ТНУ	Авиационные ГТД	Авиационные ГТД, ГТУ
Применяемые топлива	Произвольное топливо, описываемое обобщенной формулой $C_aH_bO_c$	Произвольное топливо, описываемое обобщенной формулой $C_aH_bO_c$	Произвольное топливо, описываемое обобщенной формулой $C_aH_bO_c$. $S_dN_eNe_fAr_g$

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Представление характеристик узлов	Аппроксимация табличных характеристик с возможностью переразмеривания	Типовые и произвольные характеристики узла	Типовые и произвольные характеристики узла с возможностью переразмеривания
Расчет характеристик ГТД	Дроссельные, высотно-скоростные, климатические с любыми программами регулирования	Дроссельные, высотно-скоростные	Дроссельные, высотно-скоростные, климатические, нагрузочные
Визуальное формирование проточной части, оценка массы и габаритных размеров	Нет (в отдельных версиях: RasCAD, DVIgWP)	Нет	Есть (подсистема АСТРА-ТК)
Оценка прочностных характеристик основных узлов	Нет (в повенцовой системе «Компрессор»)	Нет	Есть (подсистема АСТРА-ТК)
Оценка эмиссии вредных веществ	Нет (в отдельной версии)	Нет	Нет
Расчет переходных режимов	Есть	–	Есть
Имитация изменения зазоров и утечек тепла	Нет (в повенцовой системе «Компрессор»)	–	Есть
Учет инерции ротора	Есть	–	Есть
Учет пневматической емкости	Есть	–	Есть
Учет впрыска воды (пара) в проточную часть двигателя	Есть	Нет	Есть

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Учет термической диссоциации	Есть (в специальной версии)	–	Нет
Возможность использования разных характеристик для внутреннего и наружного контуров	Есть	–	Есть
Учет влияния числа Re	Есть	Есть	Есть
Расчет многоступенчатых охлаждаемых турбин с промежуточным охлаждением ступеней	Есть	Нет	Есть
Расчет компрессора с отбором охлаждения из промежуточных ступеней	Есть	Есть	Есть
Расчет характеристик двигателя в составе силовой установки ЛА (согласование характеристик силовой установки и планера)	Нет	Нет	Есть
Моделирование полетного цикла ЛА	Нет	Нет	Есть
Решение задач оптимизации параметров рабочего процесса	Есть	Нет	Есть, многокритериальная
Решение задач многокритериальной оптимизации программ регулирования двигателя	Нет	Нет	Есть
Решение задач имитационного моделирования работы двигателя в реальном масштабе времени (виртуальные испытания)	Нет	Нет	Есть

Рассмотрим более подробно особенности сравниваемых САЕ-систем.

САЕ-система *DVIGwT* (рис. 1) разработана в Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ). Программа работает под операционными системами Microsoft Windows 95/98/2000/Me/XP, а также Windows NT.

Данная САЕ-система обладает простым интуитивно понятным интерфейсом, поскольку основана на компонентной технологии построения модели газотурбинного двигателя.

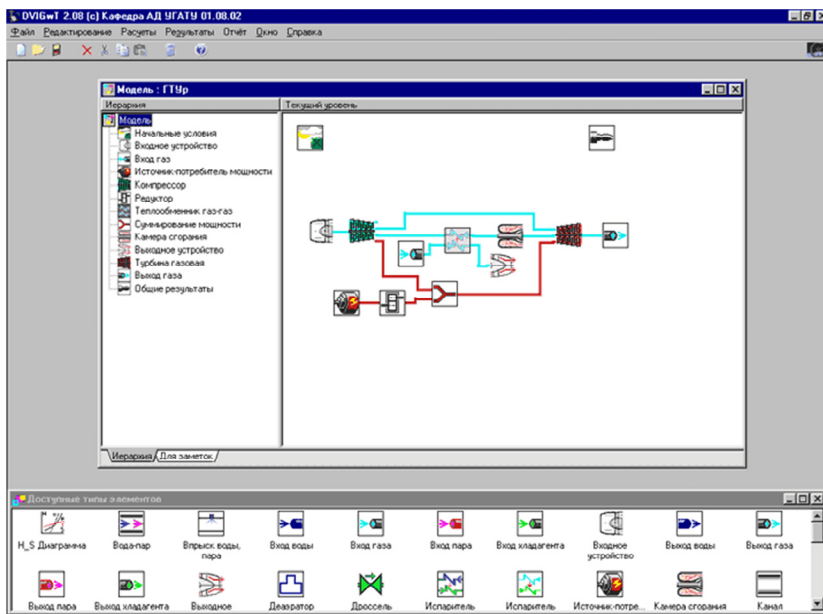


Рис. 1. Графический интерфейс DVIGwT

Выходные данные могут быть представлены в следующем виде:

- выдача результатов расчета в файл или базу данных в нескольких вариантах (полный, стандартный, определяемый пользователем), а также табличное представление результатов расчета с набором параметров, определяемых пользователем;
- графическое представление результатов расчета в виде взаимозависимостей по параметрам, указываемым пользователем, с возможностью наложения зависимостей из других массивов результатов. При этом аргументом и функцией могут быть не только результаты расчета узлов, но и дополнительно рассчитываемые величины, определяемые пользователем;
- графическое представление характеристик узлов.

Система DVIGwT используется как для учебного процесса (успешно применяется в УГАТУ), так и для сложных инженерных расчетов.

CAE-система *Uni_TTF v.5.22* (рис. 2) разработана И. А. Лещенко. Программа работает под операционными системами семейства Microsoft Windows.

Данная CAE-система обладает простым интуитивно понятным интерфейсом. Простота интерфейса обусловлена ограниченным выбором схем двигателей, а именно использованием универсальной схемы ТРДД, и небольшим функционалом. Имеется возможность использовать только модели различных компоновок ТРДД, который является наиболее распространенной схемой ГТД.

Полезной опцией данной системы является отображение отборов воздуха как на нужды двигателя, так и на самолетные нужды в графическом виде (рис. 2). При вводе некорректных значений параметров система выдает предупреждение, что заданное значение слишком мало или велико.

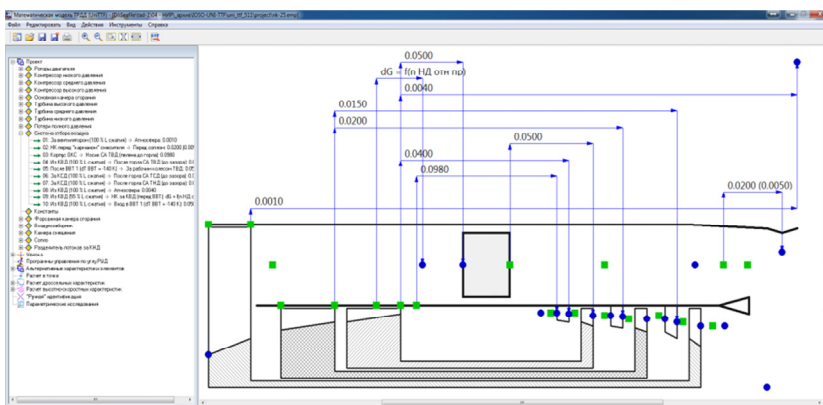


Рис. 2. Графическое отображение отборов воздуха

Система *Uni_TTF* помимо типовых характеристик узлов позволяет использовать произвольные (пользовательские) характеристики посредством загрузки файла в текстовом формате, которые также отображаются в пользовательском интерфейсе.

У начинающих пользователей может вызвать затруднение увязка двигателя, поскольку большинство действий выполняется вручную, для чего пользователю необходимо обладать теоретической базой.

Система *Uni_TTF* может использоваться как для учебного процесса, так и для инженерных расчетов ТРДД.

CAE-система *АСТРА* (рис. 3) разработана в Самарском государственном аэрокосмическом университете (СГАУ). Программа кросс-

сплатформенная, что одновременно является ее преимуществом и недостатком – для ее работы необходима среда исполнения Java Virtual Machine.

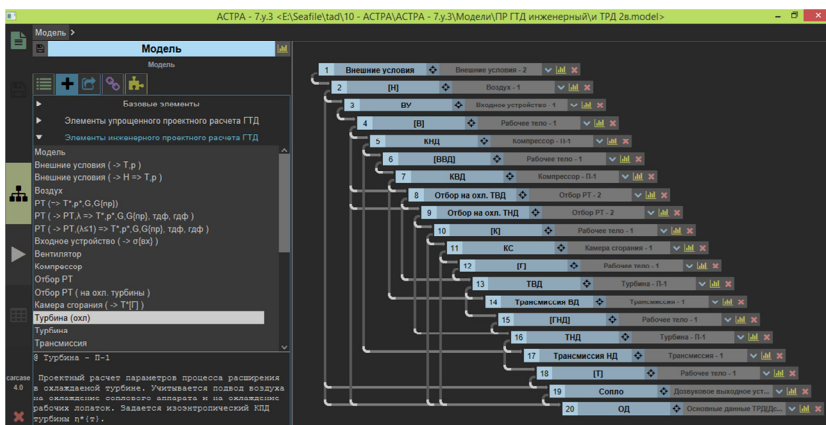


Рис. 3. Графический интерфейс АСТРА

Данная программа обладает достаточно простым интуитивно понятным интерфейсом. Начинающие пользователи могут использовать набор моделей стандартных схем двигателей, включающий 15 наименований. Более опытные пользователи могут формировать сложные многоуровневые модели, используя как модели стандартных схем двигателей, так и модели отдельных узлов и элементов (модули). Все модули для удобства разделены по категориям. В случае отсутствия необходимых моделей, их можно сформировать посредством базовых математических элементов. Для исключения ошибок при вводе данных система не позволяет задавать некорректные значения параметров.

Как видно из данных табл. 1, система АСТРА позволяет формировать проточную часть, а также оценивать габаритно-массовые и прочностные характеристики основных узлов.

Как было сказано, концептуальное проектирование ГТД и ГТУ связано в первую очередь с выбором параметров рабочего процесса, который осуществляется с помощью оптимизации, при этом критерий оптимизации должен отражать показатель качества системы более высокого уровня – летательного аппарата (ЛА). САЕ-система АСТРА позволяет проводить оптимизацию параметров рабочего процесса с определением показателей эффективности по результатам моделирования основных этапов полетного цикла летательного аппарата.

При достигнутом высоком уровне параметров рабочего процесса газотурбинных двигателей актуальной является задача дальнейшего повышения эффективности эксплуатации летательных аппаратов путем оптимизации управления ГТД по критериям эффективности ЛА, рассчитываемых с учетом моделирования полета по заданной траектории. Данную задачу позволяет решить только САЕ-система АСТРА.

Совокупность взаимосвязанных элементов и модулей операций представляет собой модель задачи, решаемой с использованием модели исследуемого двигателя. Модель задачи, в свою очередь, может комбинироваться с моделями других задач, тем самым, возможно создавать модели комплексных задач с автоматической передачей данных между подзадачами. Данная возможность несомненно является достоинством САЕ-системы АСТРА.

Например, обобщенная постановка задачи выбора параметров рабочего процесса семейства ГТД на базе унифицированного газогенератора (ГГ) формулируется следующим образом: необходимо определить рациональные значения параметров рабочего процесса унифицированного ГГ для семейства ГТД и параметры рабочего процесса каждого из двигателей семейства. Искомые параметры должны обеспечивать максимально возможную эффективность проектируемых двигателей по совокупности критериев летательного аппарата, при ограничениях, гарантирующих работоспособность ГТД. При такой постановке решается две вложенных задачи оптимизации: выбор рациональных параметров ГГ для всего семейства двигателей и оптимизация параметров каждого двигателя при заданном унифицированном ГГ [4].

САЕ-система АСТРА позволяет решать задачи имитационного моделирования (рис. 4), которые становятся более востребованными [5]. Метод имитационного моделирования может рассматриваться как своеобразный экспериментальный метод исследования, в котором испытанию подвергается не сам объект, а реализованная на ЭВМ его имитационная модель, позволяющая в том числе контролировать и изменять параметры в процессе вычисления в реальном масштабе времени.

Необходимо отметить, что в системе АСТРА, в отличие от системы Uni_TTF, пользователю при формировании модели ГТД не нужно в явном виде описывать систему невязок и указывать варьируемые переменные. Достаточно указать способ определения параметров элементов (рассчитывается, задается пользователем, связан с другим параметром).

Для проведения большого числа расчетов либо для упрощения сложных табуляций есть возможность распараллеливания расчетов путем запуска неограниченного количества экземпляров программы, которая ограничивается лишь конфигурацией компьютера.

Система АСТРА используется как для учебного процесса (успешно применяется в СГАУ), так и для сложных инженерных расчетов.

Все представленные САЕ-системы, используемые для инженерных расчетов, имеют примерно одинаковые возможности.

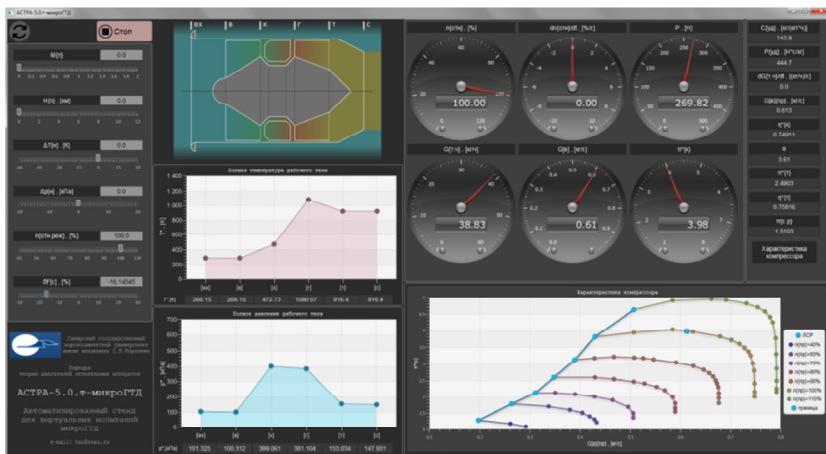


Рис. 4. Виртуальная лаборатория испытаний микроГТД в АСТРА

Общим недостатком представленных программ является отсутствие оценки показателей эмиссии, шума двигателей, а также стоимости жизненного цикла двигателя и стоимости самого двигателя.

Разработка математических моделей эмиссии и шума двигателей является актуальной и важной задачей, поскольку в настоящее время к разрабатываемым двигателям предъявляются все более жесткие требования по экологии и охране окружающей среды. Использование математических моделей шума и эмиссии при оптимизации параметров двигателей позволяет получать результаты, более приближенные к реальности (поскольку накладываются дополнительные ограничения по экологическим факторам).

Оценка стоимости жизненного цикла двигателя и стоимости самого двигателя также в настоящее время становится все более актуальной задачей, поскольку использование моделей стоимости двигателя при оптимизации его параметров позволит спроектировать более конкурентный двигатель.

Направления совершенствования и требования к современной математической модели для термодинамических расчетов ГТД описаны в работе [6]. Наиболее важным направлением совершенствования явля-

ется проработка допущений для выхода на качественно новый уровень моделирования, т. е. приближения к реальной картине протекания физических процессов.

Другим направлением совершенствования является создание гибридных САЕ-систем, которые будут включать в себя не только математические, но и логико-лингвистические модели. Причем математические модели должны быть ориентированы на перспективные двигатели следующих поколений.

1. Горюнов И. М. Термогазодинамические расчеты ГТД и теплоэнергетических установок с использованием системы DVIGwT // Вестн. Уфим. гос. авиац. технического университета. 2006. Т. 7, № 1. С. 61–70.

2. Кузьмичев В. С. Методы и средства концептуального проектирования авиационных газотурбинных двигателей в САЕ-системе «АСТ-РА» / В. С. Кузьмичев, А. Ю. Ткаченко, В. Н. Рыбаков, И. Н. Крупенич, В. В. Кулагин // Вестн. Самарск. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 5 (36). Ч. 1. С. 160–164.

3. Горюнов И. М., Болдырев О. И. Направления развития современных математических моделей рабочих процессов газотурбинных двигателей // Современные проблемы науки и образования : науч. электрон. журнал. 2011. № 6. URL: www.science-education.ru/100-5180.

4. Рыбаков В. Н. Методы оптимизации и выбора параметров рабочего процесса унифицированного газогенератора и семейства газотурбинных двигателей, создаваемых на его базе / В. Н. Рыбаков, В. С. Кузьмичев, А. Ю. Ткаченко // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 25–27 июня 2014 г. Самара: СГАУ. 2014. Ч. 1. С. 238–239.

5. Ткаченко А. Ю. Имитационное моделирование рабочих процессов газотурбинных двигателей / А. Ю. Ткаченко, В. Н. Рыбаков, Я. А. Остапюк, Е. П. Филинов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 25–27 июня 2014 г. Самара: СГАУ. 2014. Ч. 1. С. 232–234.

6. Болдырев О. И. Направления совершенствования и требования к современной математической модели для термодинамических расчетов ГТД // Молодой ученый. 2011. Т. 1. № 11 (34). С. 31–35.

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ НА ФОРМУ ПОЛУЧАЕМЫХ ВОЛОЧЕНИЕМ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ

С. В. Паршин

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Рассмотрено моделирование процесса производства труб с переменной толщиной стенки с целью установления диапазона изменения размеров и формы конечной трубы в зависимости от коэффициента трения.

The article is devoted to modeling of the variable wall thickness tubes manufacturing process in order to establish the range of the final tube dimensions and shape changes depending on the friction coefficient.

Развитие машиностроения, в частности атомного и теплотехнического, невозможно без использования специальных видов металлопродукции, отличающейся специальной формой профиля, соответствующей области применения. К такой металлопродукции относятся экономичные профили, в частности профильные трубы. Эффект от их применения может быть определяющим при проектировании и строительстве той или иной машины.

Отдельный класс составляют трубы с переменной по сечению толщиной стенки. Одним из способов их производства является волочение на оправке. Получение профильных труб волочением – процесс, сочетающий относительно высокую производительность процесса, распространенность оборудования с возможностью получения сложных форм поперечного сечения трубы [1, 2]. Существует, в частности, возможность получения труб с круглым отверстием и профильной наружной формой, и, наоборот, – с круглой наружной формой и профильным внутренним отверстием [3].

Процесс получения таких труб значительно отличается от получения труб с постоянной по сечению толщиной стенки тем, что в очаге деформации имеет место пластическое течение металла из зон с малой в зоны с большой толщиной стенки. Величина такого перемещения материала в поперечном направлении (по отношению к направлению волочения) зависит от множества факторов, где одним из важнейших является значение коэффициента трения на поверхностях контакта волоки и трубы, а также оправки и трубы. Коэффициент трения определяется типом применяемой смазки, материалами волоки, оправки и трубы, шероховатостью этих поверхностей, наличием и типом подсмазочного

слоя и другими факторами. Измерение коэффициента трения на практике возможно лишь с определенной погрешностью, что связано с большим количеством влияющих на него факторов. Таким образом, можно говорить, что для конкретного расчетного случая коэффициент трения имеет определенный, зачастую, весьма широкий диапазон.

Для определения влияния коэффициента трения на форму готового профиля трубы была создана конечно-элементная модель процесса, включающая модели отрезка трубы, оправку и волоку (рис. 1). Для снижения объема расчетов использовано допущение плоскостной симметрии.

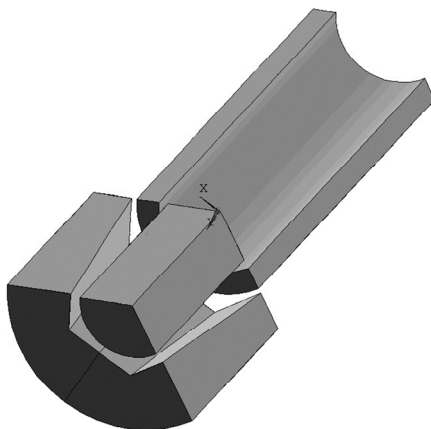


Рис. 1. Твердотельные модели процесса

Твердотельное моделирование реализовано с использованием пакета Компас-3D, конечно-элементное – в пакете AnSys (рис. 2). Производилась симуляция процесса волочения труб с шестигранным наружным (размер под ключ 45 мм) и круглым внутренним профилем (диаметром 36 мм). Материал труб – сталь 12X18H10T. В силу использования на практике волок и оправок из твердого сплава, модели их были приняты недеформируемыми.

Задан комплекс граничных условий в перемещениях – ограничение всех степеней свободы для моделей волоки и оправки, рабочее перемещение трубы. С целью определения формы установившегося профиля, длина модельного отрезка трубы – около 4–5 диаметров трубы, а перемещение – не менее 80 % длины трубы.

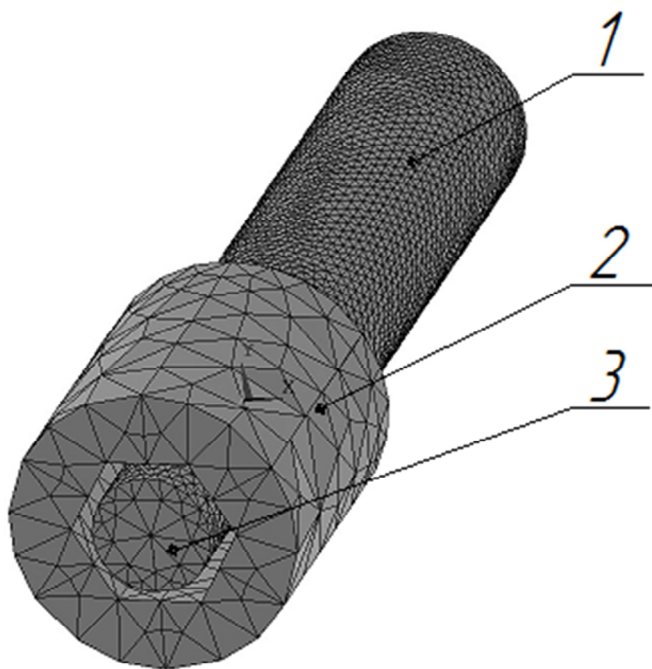


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса волочения профильных труб: 1 – модель трубы, 2 – модель волоки, 3 – модель оправки

Исследовались предельные значения коэффициента трения, причем минимальным значением этого показателя является 0 (полное отсутствие трения), а максимальным – такое, при котором волочение прекращается и начинается растяжение трубы с последующим ее обрывом («заклинивание» трубы в волоке). Максимальное значение коэффициента трения для рассматриваемого процесса – около 0,04.

Были получены схемы формоизменения (рис. 3), отражающие форму готового профиля трубы, а в частности, получаемые радиусы скругления на гранях профиля. Значение указанного радиуса меняется от 1,1 мм при отсутствии трения до 6 мм при максимальном значении коэффициента трения. Установлено, что с увеличением коэффициента трения значительно растет и радиус, что связано с ухудшением условий течения металла в углах профиля.

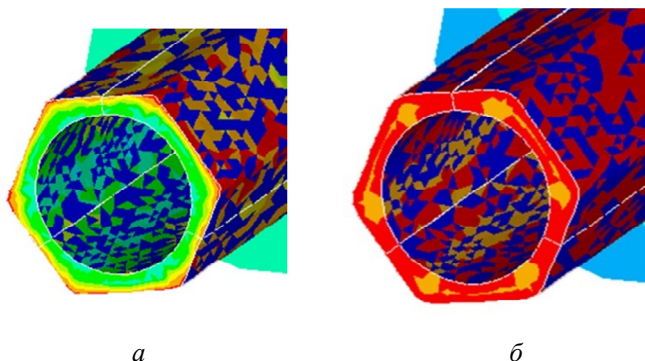


Рис. 3. Форма готовых труб: *а* – при минимальном значении коэффициента трения; *б* – при максимальном значении.

Таким образом, удалось определить границы, в которые укладывается значение радиуса скругления при гранях профиля, значение прогиба граней и другие геометрические параметры, что позволяет утверждать следующее:

1. При заданных свойствах материала и параметрах инструмента форма готового профиля является предопределенной с определенной точностью.

2. Если готовые трубы производятся по определенным требованиям стандартов или заказчика, существуют границы коэффициента трения, выход за которые приводит к появлению брака.

Конечно-элементное моделирование позволяет определять эти границы для любых геометрических параметров инструмента и трубы, что делает возможным технологическую подготовку процесса с малым объемом испытаний и без подгонки инструмента, позволяет резко снизить объем доводочных операций или вовсе их избежать.

Предложенная методика также может быть использована при исследовании деформации труб с целью выявления параметров их надежности. В частности, возможно определять поврежденность материала труб в характерных точках, что делает возможным предсказание вероятности разрушения трубы как при ее производстве, так и при дальнейшей эксплуатации.

1. *Паршин С. В.* Состояние и перспективы развития производства профильных труб // Производство проката. 2008. № 2. С. 32–35.

2. *Паршин С. В.* Процессы и машины для изготовления профильных труб // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 356 с.
3. *Данченко В. Н.* Производство профильных труб / В. Н. Данченко, В. В. Сергеев, Э. В. Никулин. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 224 с.

О КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНИК ФИГУРНОЙ ЛИСТОВОЙ РЕЗКИ ДЛЯ МАШИН С ЧПУ И ОДНОЙ ЗАДАЧЕ МАРШРУТИЗАЦИИ ИНСТРУМЕНТА

А. А. Петунин¹, В. И. Кротов²

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²ООО «Технокомпроект», Екатеринбург

В статье рассматривается задача маршрутизации инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ. Дается классификация различных техник резки, используемых для формирования маршрута при листовой резке деталей. Формулируется задача минимизации времени резки и приводится ее формальная постановка в виде задачи дискретно-непрерывной оптимизации. Проводится дискретизация множества допустимых решений задачи и ее сведение к обобщенной задаче курьера (GTSP) с дополнительными ограничениями. Для решения последней обосновывается применения математической модели проф. Ченцова, основанной на аппарате динамического программирования.

In the paper the problem of tool path modeling (routing) for CNC (Computer Numerical Control) cutting machines is considered. Classification of cutting techniques and general mathematical model of problem are offered. The task of time minimization for different cutting techniques is described. We show that task can be modeled as discrete optimization problem (generalized travel salesman problem with additional constraints, GTSP). For the solution GTSP it is offered to use Prof. Chentsov's model that base on a dynamic programming.

Многие задачи технологического проектирования могут быть интерпретированы в терминах маршрутных задач дискретно-непрерывной оптимизации, в которых значение целевой функции определяется не только порядком (последовательностью) обхода конечного набора некоторых множеств, но и «непрерывными» параметрами, определяющими траектории маршрута. Чаще всего эти параметры являются элементами континуальных числовых множеств. К таким задачам дискретно-непрерывной оптимизации, возникающим при разработке управляющих программ для машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением (ЧПУ), относятся задачи определения маршрута режущего инструмента, обеспечивающего вырезку из листового материала заданных раскройной картой деталей и минимизацию временных и стоимостных характеристик процесса резки. Предметом данной статьи является классификация этих задач и рассмотрение некоторых частных

случаев дискретизации получаемой дискретно-непрерывной математической модели.

Рассмотрим понятие маршрута инструмента применительно к некоторым технологиям фигурной листовой резки. В настоящее время в промышленном производстве для раскроя листовых материалов используются в основном следующие технологии: лазерная, плазменная, газовая и гидроабразивная. Эти и некоторые другие технологии резки предполагают, что для сохранения требуемой геометрии детали траектория движения режущего инструмента не совпадает с граничным контуром детали, а задается некоторой эквидистантой этого контура, поскольку часть материала вырезается («сгорает», «вымывается» и пр.) в процессе резки. Еще одна особенность фигурной резки – необходимость предварительной врезки (пробивки) материала перед процессом резки непосредственно по эквидистантному контуру детали. Пробивка материала сопровождается дополнительными деформациями материала в точке врезки, поэтому производится на расстоянии (дистанции) от контура реза большим, чем величина припуска на рез. При этом точка выключения инструмента в общем случае не совпадает с точкой врезки и также может не лежать на эквидистантном контуре детали. Один из способов резки детали показан на рис. 1. Если используется стандартная техника резки, то в этом случае каждый замкнутый контур вырезается целиком, и после резки одного контура переход к следующей точке врезки происходит с выключенным инструментом на холостом ходе (рис. 2, а). Примером нестандартной техники может служить «цепная» резка, которая заключается в резке нескольких контуров с использованием одной точки врезки (рис. 2, б).

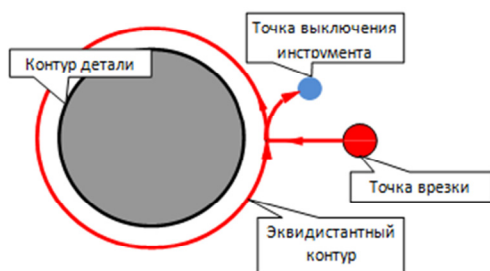


Рис. 1. Схема резки круглой детали с врезкой по прямой линии и выходом из контура по дуге окружности

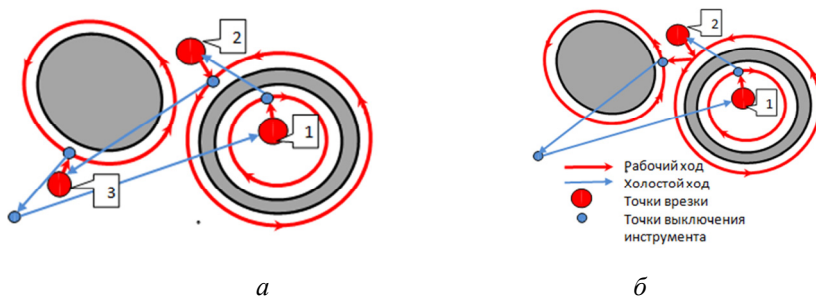


Рис. 2. Пример схемы резки двух деталей с использованием стандартной техники резки «по замкнутому контуру» (а) и с применением «цепной» резки (б)

На практике применяется также техника частичной резки замкнутого контура детали с последующим завершением резки контура после резки контура другой детали (см., напр., рис. 3) или группы контуров других деталей, а также используются другие специальные приемы, целью которых является оптимизация различных параметров, характеризующих процесс резки, и соблюдение необходимых технологических требований резки.

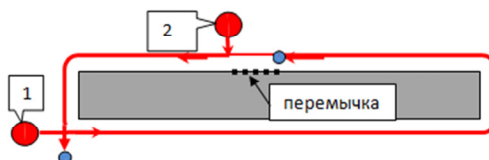


Рис. 3. Схема формирования перемычки на контуре при мультисегментной резке полосы

Основные технологические требования фигурной резки на машинах с ЧПУ обусловлены необходимостью учета возникающих деформаций материала и искажения геометрических размеров вырезаемых деталей. Применение специальных техник позволяет уменьшить негативный эффект, который особенно значителен при использовании газовой и плазменной технологий резки. Так, показанный на рис. 3 пример использования резки детали с перемычкой, иллюстрирует прием уменьшения деформаций материала при термической резке за счет фиксации детали в материале. Оставленная перемычка вырезается после «остывания» материала.

Все используемые техники фигурной резки на машинах с ЧПУ можно разделить на 3 класса:

1. *Резка по замкнутому контуру (стандартная техника)*: в этом случае каждый сегмент резки (траектория инструмента на рабочем ходе между точкой врезки и точкой выключения инструмента) содержит ровно один эквидистантный контур детали, который вырезается целиком.
2. *Мультисегментная резка контура*: в этом случае для вырезки одного контура используются не менее двух сегментов резки.
3. *Мультиконтурная резка*: резка предполагает вырезку нескольких контуров в одном сегменте.

Мультиконтурная резка, в свою очередь, может быть реализована с использованием следующих техник:

- *цепная резка*: в этом случае каждый контур вырезается целиком, при этом переход к резке другого контура осуществляется на рабочем ходе;
- *цепная резка с применением техники частичной резки контура*: вырезка в одном сегменте нескольких контуров, некоторые из которых могут вырезаться не целиком, с переходом на рабочем ходе к резке других контуров и с последующим возвращением для завершения резки частично вырезанного контура. В качестве примера такой техники можно привести, например, технику «змейка» (рис. 4) и более часто используемую технику, известную как «мост» (рис. 5).

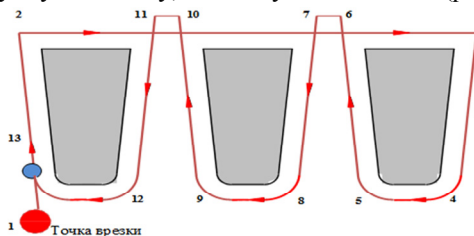


Рис. 4. Мультиконтурная резка «змейкой» трех одинаковых деталей

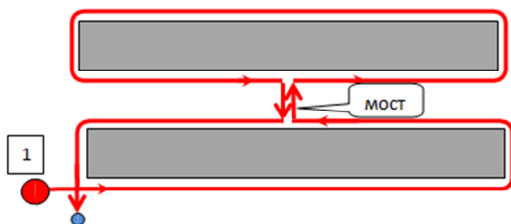


Рис. 5. Мультиконтурная резка полос с использованием техники «мост»

Для уменьшения длины рабочего хода инструмента применяют т. н. «совмещенный» рез. Он используется для вырезки деталей, которые содержат прямолинейные отрезки в контуре и которые в процессе раскроя размещаются таким образом, что имеют общую границу по одному из таких прямолинейных отрезков. Общая прямолинейная граница позволяет размещать заготовки с половинным припуском на рез (т. е. на ширину реза), поскольку режется только один раз, что экономит материал и сокращает суммарную длину резки на величину совмещенного реза. Совмещенный рез реализован, в частности, в технике резки «восьмерка», применяемой для резки двух одинаковых деталей (рис. 6). В этой технике используется также идея цепной резки.

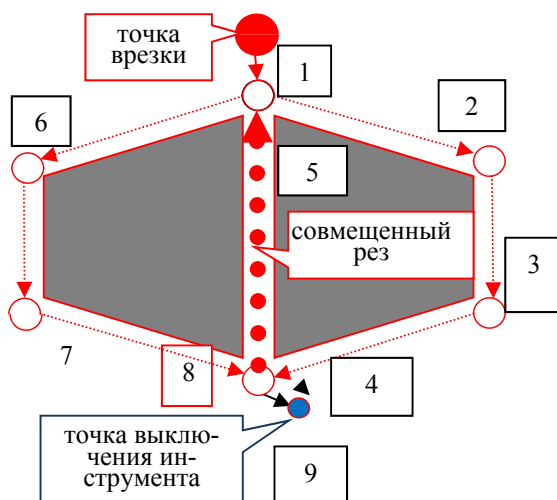


Рис. 6. Схема резки «восьмеркой» двух деталей

При использовании любой техники резки маршрут резки включает в себя следующие компоненты:

- 1) точки врезки;
- 2) сегменты резки;
- 3) точки выключения инструмента;
- 4) линейное перемещение инструмента на холостом ходе между точкой выключения инструмента и следующей точкой врезки.

Рассмотрим задачу минимизации времени резки деталей на машине с ЧПУ. Для сформированного маршрута время резки T_{cut} вычисляется по следующей формуле:

$$T_{cut} = L_{on} \div V_{on} + L_{off} \div V_{off} + N_{pt} * t_{pt}, \quad (1)$$

где L_{on} – длина реза с включенным режущим инструментом (рабочий ход); V_{on} – скорость рабочего хода инструмента машины с ЧПУ; L_{off} – длина переходов с выключенным режущим инструментом (холостой ход); V_{off} – скорость холостого хода; N_{pt} – количество точек врезки; t_{pt} – время, затрачиваемое на одну врезку. Для конкретной задачи (для конкретного материала и конкретного оборудования) значения V_{on} , V_{off} и t_{pt} являются константами. Строго говоря, реальная величина скорости V_{on} в целевой функции (1) может несколько отличаться (в зависимости от геометрии маршрута) от заданной пользователем в управляющей программе, но проблема увеличения точности вычисления V_{on} является самостоятельной задачей и может быть решена с помощью проведения достаточного числа экспериментов, позволяющих определить достоверный поправочный коэффициент [1].

Таким образом, маршрут резки (и, соответственно, значение целевой функции) однозначно определяется набором точек врезки и связанными с ними точками выключения инструмента, геометрией сегментов резки и порядком (последовательностью) обхода точек врезки.

Рассмотрим формальную постановку рассматриваемой задачи оптимизации времени при определенных ограничениях на множество допустимых маршрутов. Пусть A_1, A_2, \dots, A_n – двумерные геометрические объекты (точечные замкнутые множества), представляющие собой односвязные или многосвязные области, ограниченные одной или несколькими замкнутыми кривыми (граничными контурами). Данные объекты являются геометрическими моделями плоских деталей. Пусть также на двумерной плоскости определена область размещения объектов B , которая является геометрической моделью листового материала, из которого вырезаются детали. Будем полагать, что зафиксирован некоторый вариант размещения объектов в области размещения, при этом выполнены условия взаимного не пересечения объектов. Полагаем также, что выполнены другие дополнительные условия, обусловленные

технологическими требованиями резки деталей на конкретном технологическом оборудовании с ЧПУ, в частности условие соблюдения необходимой ширины реза. Другими словами, фиксированный вариант размещения объектов является допустимым вариантом раскроя листового материала для заданного набора деталей.

Обозначим через N – число внешних и внутренних замкнутых контуров ($N \geq n$), описывающих размещение деталей в области размещения.

Будем полагать, что определено число сегментов резки N_1 , которое будет использоваться в маршруте (при применении только техники резки «по замкнутому контуру» $N_1 = N$). Сегмент может содержать несколько контуров (при мультиконтурной резке), а также часть контура (при мультисегментной резке). Обозначим через $M_i = (x_i, y_i)$ – точки врезки для каждого сегмента ($i = 1, 2, \dots, N_1$). Для упрощения задачи будем считать, что каждая точка врезки индуцирует только одну точку выключения инструмента и однозначно определяет траекторию сегмента. Тогда проектирование маршрута резки будет заключаться в определении для каждого сегмента точки врезки инструмента M_i и последовательности обхода сегментов. Последовательность сегментов для резки задается перестановкой $I = (i_1, i_2, \dots, i_{N_1})$ порядка N_1 , т. е. упорядоченным набором натуральных чисел от 1 до N_1 (биекцией на множестве $\{1, 2, \dots, N_1\}$, которая числу $k \in \{1, 2, \dots, N_1\}$ ставит в соответствие элемент i_k из набора I). Тогда, в соответствии с данными обозначениями, маршрут резки деталей A_1, A_2, \dots, A_n однозначно определяется вектором R размерности $3N_1$:

$$R = (i_1, x_{i_1}, y_{i_1}, i_2, x_{i_2}, y_{i_2}, \dots, i_{N_1}, x_{i_{N_1}}, y_{i_{N_1}}).$$

Элементами этого вектора являются и элементы перестановки, определяющей порядок резки сегментов, и вещественные координаты точек врезки. Таким образом, сформулированная задача оптимизации времени резки заданных деталей для определенного варианта раскроя при описанных выше допущениях сводится к поиску вектора R , для которого целевая функция (1) достигает минимума.

Пусть G – множество допустимых значений вектора R . Рассмотрим далее, какие виды условий (ограничений) определяют это множество.

1. *Условие предшествования.*

Это условие накладывает ограничения на порядок вырезки сегментов $I = (i_1, i_2, \dots, i_{N_1})$. Эти ограничения, в свою очередь, порождаются ограничениями на порядок вырезки контуров. Как отмечено выше, каждая деталь (объект) A_1, A_2, \dots, A_n ограничена одним внешним контуром и может содержать внутренние контуры. Ограничения на порядок их резки обусловлены особенностями технологии и оборудования листовой резки с ЧПУ, которые не позволяют после вырезки внешнего контура точно позиционировать инструмент для вырезки внутренних контуров, поскольку деталь после вырезки внешнего контура может изменить свое положение на раскройном столе. При выборе последовательности резки контуров следует придерживаться следующих правил.

Правило 1. Если внешний контур имеет один или более внутренних контуров, которые представляют собой границы отверстий в деталях, то прежде, чем будет вырезан внешний контур, должны быть вырезаны все внутренние контуры технология листовой резки на машинах с ЧПУ.

Правило 2. Если внутренний контур детали на раскройной карте содержит внешний контур/контуры другой детали, то сначала должна быть вырезана эта другая деталь с соблюдением Правила 1.

Перечисленные правила и называются условием предшествования для перестановки $I = (i_1, i_2, \dots, i_{N_1})$.

Ограничения на координаты точек врезки и точки выключения инструмента

Этот тип ограничений связан с тем, что для соблюдения технологии резки точка врезки должна лежать на некотором ненулевом расстоянии от эквидистантного контура детали (для точки выключения инструмента это расстояние, как отмечено выше, может быть и нулевым). Величины необходимых минимально допустимых расстояний от эквидистант до точек врезки и точек выключения инструмента определяются (как и расстояния от контуров деталей до их эквидистант) различными технологическими параметрами.

Ограничения, связанные с технологическими требованиями термической резки

При применении технологий термической резки (газовой, плазменной, лазерной) могут возникать и другие ограничения на порядок вырезки сегментов $I = (i_1, i_2, \dots, i_{N_1})$ и на выбор точек врезки

$$M_i = (x_i, y_i) \text{ [2].}$$

Как нетрудно видеть, сформулированная задача (1) относится к классу трудных задач оптимизации (прежде всего из-за большой раз-

мерности вектора R : в практических задачах число контуров N_1 исчисляется десятками и сотнями, а множество точек врезки имеет континуальную мощность), и применение классических методов математического программирования не представляется возможным.

Рассмотрим конечное подмножество G^1 множества G допустимых значений вектора R ($G^1 \subset G$). Для этого свяжем с каждым сегментом некоторый конечный набор допустимых точек врезки и точек выключения инструмента M_i, M_i^* . Будем полагать, что число допустимых точек врезки для разных сегментов может различаться.

Пусть k^i – число возможных точек врезки в сегменте i , K – суммарное число точек врезки ($K = \sum_{i=1}^{N_1} k^i$). Здесь R^1 – вектор, состоящий уже из $2N_1$ элементов: $R^1 = (i_1, i_2, \dots, i_{N_1}, s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_{N_1}})$, где s_{i_m} – номер выбранной точки врезки для контура i_m ($1 \leq s_{i_m} \leq k_{i_m}$).

В общем случае, если не накладывать никаких условий на элементы векторов множества G^1 , то мощность этого множества равна $N_1! \prod_{i=1}^{N_1} k_i$.

В такой постановке задача минимизации целевой функции (1) может рассматриваться как обобщенная задача коммивояжера (*generalized travelling salesman problem, GTSP*) с дополнительными ограничениями, сформулированными выше. Все это приводит к необходимости разработки специализированных алгоритмов маршрутизации. Некоторые такие алгоритмы описаны [3–5]. Однако они не учитывают многие технологические требования термической резки. В этом плане весьма удобной представляется математическая модель «мегаполисов» А. Г. Ченцова [6], которая позволяет учитывать и условия предшествования и ряд других технологических требований листовой резки. В основе этой модели лежит специальный вариант аппарата динамического программирования, который позволяет для размерностей вектора R^1 порядка $N < 30$, на стандартных персональных компьютерах находить оптимальные решения за приемлемое время, что весьма затруднительно при использовании традиционных алгоритмов решения *GTSP*. На основе этой модели для случая использования стандартной техники резки разработано программное обеспечение для решения задачи (1), а также ряд приближенных алгоритмов ее решения [7].

-
1. Определение поправочных коэффициентов для скорости рабочих переходов инструмента в целевой функции для задач оптимизации маршрута инструмента / А. Ф. Таваева, А. А. Петунин // Информационные технологии и системы [Электронный ресурс] : труд Четвертой междунар. науч. конф., Банное, Россия, 25 февр. – 1 марта 2015 г. (ИТиС–2015) : науч. электрон. изд. Челябинск: ЧелГУ, 2015. С. 45–47.
 2. Петунин А. А. О некоторых стратегиях формирования маршрута инструмента при разработке управляющих программ для машин термической резки материала. // Вестник УГАТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 280–286.
 3. Helsgaun K., 2014. Solving the Equality Generalized Traveling Salesman Problem Using the Lin-Kernighan-Helsgaun Algorithm. Tech. Rep. December 2013. Roskilde University, Roskilde.
 4. Dewil R., Vansteenwegen P., Catrysse D., Mar. 2011. Cutting Path Optimization Using Tabu Search. Key Engineering Materials 473. 739–748.
 5. Yang W. B., Zhao Y. W., Jie J., Wang W. L., Mar. 2010. An Effective Algorithm for Tool-Path Airtime. Optimization during Leather Cutting. Advanced Materials Research 102, 373–377.
 6. Ченцов А. Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. М. ; Ижевск.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 240 с.
 7. Локальные вставки на основе динамического программирования в задаче маршрутизации с ограничениями / Петунин А. А., Ченцов А. Г., Ченцов П. А. // Вестн. Удмурт. ун-та. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2014. № 2. С. 56–75.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А. В. Пилипенко, А. П. Пилипенко, О. В. Пилипенко
Госуниверситет-УНПК, Орел

В данной работе авторы освещают проблему увеличения энергоэффективности и долговечности гидропрессового оборудования за счет внедрения автоматизированной системы управления с элементами динамического моделирования.

In this article the authors analyze the problem of increasing energy efficiency and durability the hydraulic equipment due to introduction of the automated control system with elements of dynamic modeling.

В современных экономических условиях для промышленных предприятий наиболее актуальным является выпуск конкурентоспособной продукции с минимальными затратами. Производство изделий и деталей методами формоизменяющих операций характеризуется экономичностью расходования металла, возможностью получать детали высокой точности. При обеспечении оптимальных параметров работы оборудования, в частности за счет использования систем автоматизации, достигается значительное увеличение показателей его долговечности и энергоэффективности производства.

Внушительное количество технологических процессов обработки материалов давлением выполняется на гидропрессовом оборудовании. Современные гидравлические прессы имеют автоматизированные системы управления электро- и гидроприводом, калибровки, устранения перекоса траверсы, анализа качества продукции и состояния оснастки. Однако не все производственные предприятия имеют возможность быстро заменить имеющийся парк гидропрессового оборудования на новый. Современные информационные технологии и технические средства автоматизации позволяют модернизировать любое оборудование с минимальными затратами.

Для внедрения системы автоматизации и оптимизации параметров работы оборудования необходимо иметь представление о динамических процессах, происходящих в системах при выполнении операций, и связях между работой гидросистемы, электропривода, главного исполнительного механизма.

В данной статье предложена система автоматизации гидропресса, отличающаяся алгоритмами управления электро- и гидроприводами,

позволяющими диагностировать и отслеживать работу систем во время выполнения технологического процесса в интерактивном режиме и выработать корректирующие управляющие воздействия. В качестве опытного образца использовался гидравлический пресс с усилием 630 кН модели ДВ 2428А, на который устанавливались штампы вырубки/пробивки и валковой штамповки.

Особенностью гидравлических прессов как машин с гидравлическим приводом является наличие в цилиндрах и трубопроводах больших объемов рабочей жидкости, вследствие чего при их работе возникают динамические процессы колебания давления жидкости в гидросистеме. Вопросами динамики гидравлических прессов занимались такие ученые, как Б. В. Розанов, А. И. Зимин, М. В. Сторожев, которые отмечали, что вследствие упругой деформации в системах гидравлических прессов затрудняется выполнение операций с резким сбросом нагрузки, так как при этом происходит гидравлический удар в трубках, сотрясение прессы, нарушение уплотнений и перекос траверсы [1]. Внедрение адаптивных систем управления, способных учитывать и уменьшать динамические процессы колебания, в устаревшее гидропрессовое оборудование позволяет сократить затраты на переоснащение производства, а также добиться повышения качества продукции и энергоэффективности технологических процессов.

Вопросы адаптивного управления прессом поднимали С. С. Одинг, И. А. Кретов, которые разработали алгоритм учета отклонений параметров материала заготовки от параметров, заложенных в математическую модель материала, позволяющий корректировать программу деформирования непосредственно в ходе формообразования [2]. Однако в своих работах они рассматривали только технологический процесс вытяжки, и сравнение проводилось с параметрами, заложенными в упрощенную математическую модель.

Адаптивные системы управления пневматическими приводами на основе математического моделирования изучал Michael Brian Thomas. В своих работах он подтверждает эффективность внедрения автоматизированных адаптивных систем управления на основе математического моделирования.

При принятых допущениях процессы движения ползуна и станины прессы в технологических процессах формоизменения описываются системами дифференциальных уравнений первого порядка, включающих уравнения перемещения ползуна, уравнения изменения давления жидкости в напорной и сливной магистралях прессы, скорости ползуна, изменение напора насоса, перемещения и скорости станины, изменения давления в поршневой камере при различных режимах работы насоса (1).

Математическое моделирование работы гидропрессового оборудования с учетом параметров работы гидронасоса значительно уменьшает количество допущений, таких как сжимаемость жидкости, неравномерность подачи жидкости насосом и расход жидкости через дроссель. Моделирование насосного агрегата позволяет исследовать давление в поршневой камере при различных режимах работы насоса, оценить нагрузки на органе регулирования от давления в поршневой камере и оптимизировать систему управления.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 \frac{dv_1}{dt} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - P_d; \\ M_2 \frac{dv_2}{dt} = p_2 F_2 - p_1 F_1 - x_2 c_2 + P_d; \\ \frac{dp_1}{dt} = \alpha_1 \left(\frac{dQ_{abc}}{dt} - F_1 \frac{dx_1}{dt} + F_1 \frac{dx_2}{dt} \right); \\ \frac{dp_2}{dt} = \alpha_2 \left(F_2 \frac{dx_1}{dt} - F_2 \frac{dx_2}{dt} - q_2 \right); \\ \frac{dx_1}{dt} = v_1; \\ \frac{dx_2}{dt} = v_2; \\ \frac{dQ_{abc}}{dt} = Q_n - \left(\frac{\pi d_n^2}{4} \cdot \frac{dx_3}{dt} + \mu_{др} \cdot S_{др}(\theta) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} |p_n| \cdot p_n - k_{yt} \cdot p_n \right); \\ \frac{dx_3}{dt} = R_{вал} \cdot \sin \theta \cdot \operatorname{tg} \omega - R_{вал} \cdot \cos \theta \cdot \frac{1}{\cos^2 \gamma} - R_{вал} \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \theta \cdot \omega \end{array} \right. \quad (1.1)$$

где M_1 – масса ползуна с присоединенными деталями; M_2 – масса станины; x_1, v_1, t_1 – перемещение, скорость и время движения ползуна; x_2, v_2 – перемещение и скорость станины; c_2 – коэффициент жесткости фундаментных болтов; P_d – сопротивление деформации вырубаемого материала; F_1, F_2 – площадь поршня рабочей и возвратной полостей; Q_n – геометрическая подача поршня; p_n – давление в поршне; $R_{вал}$ – радиус поршня; k_{yt} – коэффициент утечки; p_1, p_2 – давление жидкости в рабочей и возвратной полостях цилиндра; Q_{abc} – подача насоса; α_1, α_2 – коэффициент жесткости напорной и сливной гидромагистралей пресса; q_2 – удельный расход жидкости через дроссель; γ – угол наклона диска; x_3 – перемещение поршня в гидронасосе; ω – угловая скорость вала; Q_{yt} – утечки из поршневой камеры; θ – угол разворота распределителя; β – дополнительный угол в плоскости, перпендикулярной плоскости, образованной кинематической нейтралью и ее проекцией на опорную плоскость; d_n – диаметр поршня; $S_{др}(\theta)$ – площадь окна дросселирования.

Вследствие относительного перемещения при встречном движении ползуна и станины функция $P_\partial = f(x_1 - x_2)$ существует на отрезке $x_1 - x_2 = h_M$, где h_M – длина хода.

Функции $P_\partial = f(x_1 - x_2)$ и $q_2 = f(p_2)$ существенно нелинейные.

Решение системы уравнений (1) и исследование влияния параметров на динамические процессы выполнены численным интегрированием на ПЭВМ.

Сопротивление деформации листового металла при вырубке $P_\partial = f(x_1 - x_2)$ принимается в виде аналитического выражения с учетом переменного сопротивления металла срезу в зависимости от пластических свойств вырубаемого материала и глубины внедрения пуансона.

На рис. 1 приведены графики сопротивления деформации при вырубке/пробивке и валковой штамповке. Участок графика P_∂ во время скола материала при вырубке наиболее точно описывается зависимостью:

$$P_\partial^{max} = P_0 + a \left[\frac{h_M - (x_1 - x_2)}{h_M - h_K} \right]^{\frac{1-K_2}{K_2}},$$

где P_0 – сила проталкивания пуансона после вырубки; P_∂^{max} – максимальное сопротивление деформации вырубаемого материала; $a = P_\partial^{max} - P_0$; K_2 – коэффициент заполнения графика рабочей нагрузки на участке скола (определяется эмпирическим путем), $0 < K_2 < 1$.

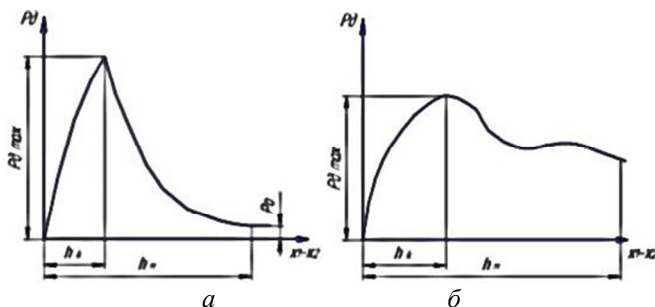


Рис. 1. Графики сопротивления деформации:

a – при вырубке/пробивке и b – при валковой штамповке: h_M – полный путь ползуна при прохождении через материал, h_k – путь ползуна от момента соприкосновения с заготовкой до начала скола

Относительное сужение при стандартных испытаниях на разрыв, как правило, равно относительному сужению поперечного сечения, следовательно:

$$P_{\partial} = P_{\partial}^{max},$$

где P_{∂}^{max} – максимальное сопротивление деформации вырубаемого материала.

Произведенные экспериментальные исследования позволили получить графики сопротивления деформации при различных технологических процессах. В математической модели (1) сопротивление деформации P_d представлено в виде уравнений кривых что также позволяет повысить точность расчетов, например, таких, как уравнение для технологического процесса валкой штамповки:

$$p(x) = \frac{253.362*x - 86.3863*x^2 - 14.6373*x^3 + 10.9418*x^4 - 1.81233*x^5 + 0.141945*x^6 - 0.00434566*x^7}{2.82589 + 11.199*x - 6.45885*x^2 + x^3}$$

Математическая модель (1) позволяет:

- исследовать влияние параметров гидропресса на динамические процессы при разделительных операциях;
- рассматривать гидравлический пресс как единую систему, в которой происходит движение ее рабочих органов, инструмента и обрабатываемой заготовки, что дает возможность проектировать процессы с оптимальными параметрами и с оптимальным управлением.

Для реализации компьютерного моделирования была выбрана среда графического программирования LabVIEW. Преимущество использования графического языка программирования LabVIEW в моделировании заключается в наличии функций (виртуальных приборов), позволяющих решать дифференциальные уравнения во времени, близком к реальному, методом Рунга – Кутты второго порядка.

Созданы программы, выполняющие компьютерное моделирование и визуализацию данных (рис. 2).

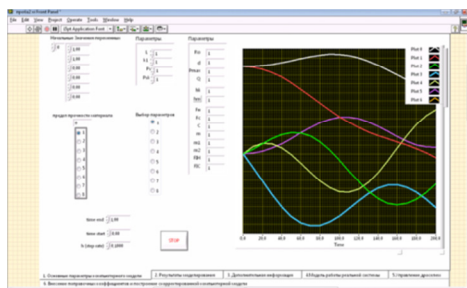


Рис. 2. Снимок окна программы компьютерного моделирования

Система компьютерного моделирования работы гидравлического пресса при технологических процессах ОМД позволила определить зависимости параметров работы оборудования и подтвердить, что система управления гидропрессовым оборудованием, учитывающая отклонения от эталонных значений, позволяет определить технические неисправности или износ оборудования. Исследования результатов компьютерного моделирования выявили параметры, требующие контроля и управления.

Разработана функциональная схема (рис. 3) автоматизированной системы управления технологическим процессом формоизменения, выполняемом на гидропрессовом оборудовании, включающая связи между основными параметрами системы.

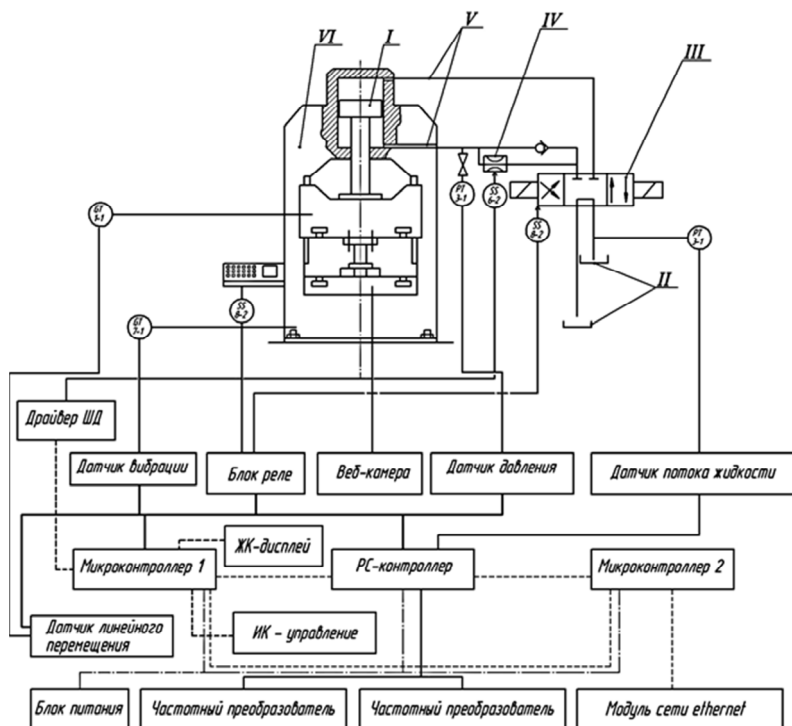


Рис. 3. Функциональная схема автоматизированной системы

На данной схеме указаны положения датчиков и управляющих устройств в системе автоматизации, где основными элементами оборудования, выполняющего технологический процесс, являются ползун I,

сливной бак II, электромагнитный клапан III, дроссельная заслонка IV, напорная и сливная магистрали V, станина пресса VI.

Система в режиме реального времени снимает информацию с датчиков давления РТ, установленных на напорной и сливной магистралях, с датчиков линейных перемещений ГТ, установленных на ползуне и станине; информация через АЦП передается на компьютер, являющийся пультом оператора; контроль изделий производится с помощью машинного зрения – камера передает сигнал, который интеллектуальными алгоритмами обрабатывается в LabVIEW; ЭВМ обрабатывает информацию и сравнивает значения со значениями, полученными путем компьютерного моделирования технологического процесса. В случае, если система обнаруживает отклонение одного из параметров технологического процесса, она выдает оператору рекомендации по оптимизации работы. Если оператор оказывается вне рабочего места, блок переключателей включает режим автоматической работы, в котором АСУ регулирует параметры технологического процесса с помощью шаговых двигателей, частотных преобразователей и блоков реле.

Общая структура системы управления представлена на рис. 4. В автоматическом режиме работы РС-контроллер задает начальные значения $x(t) = p_0(t), x_0(t), v_0(t)$, воздействуя на частоту вращения двигателя гидравлического насоса ω и расход жидкости, проходящей через дроссель q . Датчики, установленные на гидравлическом прессе, передают измеряемые параметры на блок самонастройки, который, сравнивая данные, полученные экспериментальным путем и путем компьютерного моделирования, вычисляет корректирующий коэффициент $k_{кор}$, используя логический закон управления: если $|p_{экс}| < 0,2 \cdot |p_{мат}|$, то $k_{кор} = p_{экс} \cdot k_1$; иначе $k_{кор} = p_{экс} \cdot k_2$; где $k_1 < k_2$. Регулятор формирует управляющее воздействие $U(t)$ и передает его используемому контроллеру.

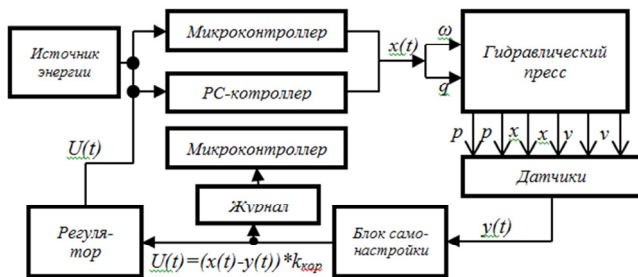


Рис. 4. Общая структура системы управления

Система управления состоит из двух микроконтроллеров и одного РС-контроллера. Алгоритм основной системы управления для РС-контроллера представлен на рис. 5. В нем выполняется следующая последовательность действий: 1 – начало; 2 – ввод названия испытания, комментария и N – количества требуемых циклов; 3 – выбор технологического процесса; 4 – технологический процесс вырубки/пробивки; 5 – технологический процесс валковой штамповки; 6 – вкл. частотный преобразователь привода гидронасоса и переместить траверсу в максимальное положение; 7 – процедура инициализации устройства сбора данных; 8 – подпрограмма диагностики микроконтроллерных модулей, входящих в систему управления; 9 – выбор режима работы: Автоматическое управление; 10 – формирование запроса на микроконтроллер 1; 11 – переход на микроконтроллер 1; 12 – перевод основной системы в спящий режим; 13 – ввод данных о материале: L, d, h ; 14 – выбор материала и его параметров; 15–19 – вид материала, плотность, график сопротивления деформации и так далее; 20 – выбор параметров работы оборудования; 21–25 – параметры регулирования, давления, скорости и так далее; 26 – сбор данных с АЦП; 27 – фильтрация данных; 28 – обработка данных и преобразование в СИ; 29 – решение дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты второго порядка; 30 – вывод на экран графиков и данных; 31 – подпрограмма сравнения данных; 32 – $i = N$?; 33 – хотите изменить N циклов и продолжить работу?; 34 – завершение работы или выбор других параметров?; 35 – конец программы.

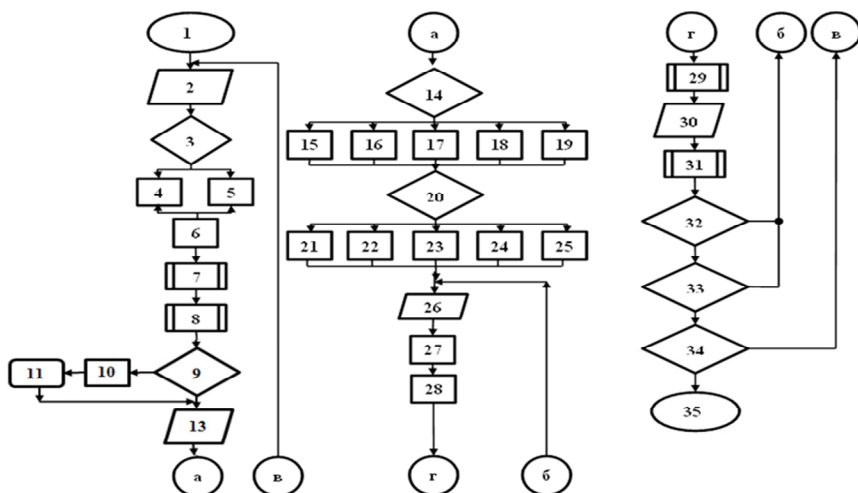


Рис. 5. Алгоритм автоматизированной системы управления

Принцип работы ПИД-регулятора: разница между текущим давлением и давлением, полученным по результатам компьютерного моделирования, умножается на настраиваемый коэффициент, получается мощность, которую надо выдать в данный момент на выходе устройства управления. Пропорциональная составляющая работает в момент появления рассогласования. Когда траверса начинает двигаться, мощность начинает падать, а когда достигает минимальной отметки, устройство выключается. Эффект от воздействия проявляется с запаздыванием, а на объект воздействует еще и окружающая среда: масса траверсы, сжимаемость жидкости и трубопровода. Чтобы компенсировать «внешние» воздействия, в цепь добавлена интегральная составляющая. В результате такого подхода интеграл становится стабильным, поэтому величина выдаваемой мощности становится постоянной. Причем, так как при этом держится нужное давление, рассогласование отсутствует, пропорциональная составляющая не работает вообще. Для компенсации влияния задержек между воздействием и реакцией системы, в систему добавлена дифференциальная составляющая. Просто пропорциональный регулятор дает мощность все время, пока давление не достигнет нужной точки; пропорционально-дифференциальный начинает снижать подаваемую мощность раньше, чем траверса доходит до нужной точки. Так как рассогласование уменьшается, имеется наличие отрицательной производной, уменьшающей воздействие. Это позволяет минимизировать давление при больших переходах.

Был составлен план эксперимента, включающий по 13 испытаний в каждом из шести экспериментов, размер выборки был рассчитан и обоснован. При этом в качестве регулируемого параметра был выбран управляемый параметр площади сечения дроссельной щели q . Анализируемыми параметрами были приняты параметры: давление в напорной магистрали p^1 , скорость траверсы v^1 , перемещение траверсы x^1 , перемещение станины x^2 .

Корреляционные зависимости скорости перемещения траверсы от площади дроссельной щели при операции валковой штамповки, представленные на рис. 6, *а* и зависимости давления в напорной магистрали от площади дроссельной щели на рис. 6, *б*, позволяют подтвердить адекватность разработанной математической модели. Погрешности находятся в пределах допустимых значений, следовательно, компьютерная модель, построенная на базе математической, работает правильно и может использоваться при разработке систем управления гидропрессовым оборудованием.

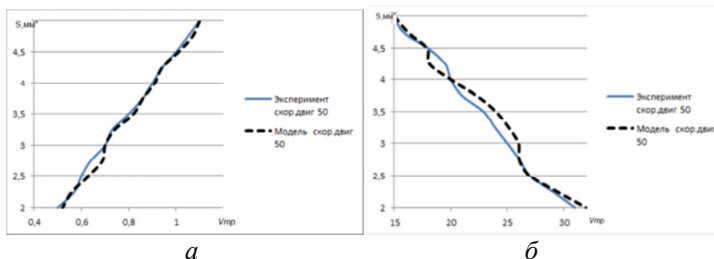


Рис. 6. Графики зависимостей при операциях валковой штамповки: *а* – скорости перемещения траверсы; *б* – давления в напорной магистрали от площади дроссельной щели

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получено решение задачи по разработке автоматизированной системы управления гидропрессовым оборудованием на основе адаптивных алгоритмов, построенных на математических моделях, имеющей значение для промышленных предприятий и исследовательского сообщества. Разработанная математическая модель позволяет исследовать влияние параметров гидропрессовой установки на динамические процессы при разделительных операциях; при этом гидравлический пресс рассматривается как единая система, в которой происходит движение ее рабочих органов, инструмента и обрабатываемой заготовки, что дает возможность проектировать машины с оптимальными параметрами и с оптимальным управлением и служить основой для расчета процессов в прессах при операциях с большим рабочим ходом. Исследования прошли апробацию в условиях реального производственного предприятия, что подтверждается актом о внедрении. Автоматизированное управление параметрами работы гидропресса позволило оптимизировать энергозатраты на технологический процесс, уменьшить расход и увеличить износостойкость рабочего инструмента.

1. *Сторожев М. В., Попов Е. А.* Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
2. *Одинг С. С., Кретов И. А.* Адаптивное программное управление процессом обтяжки профильных заготовок из алюминиевых сплавов// Кузнечно-штамповочное производство: Обработка материалов давлением. 2004. № 7. 40–44 с.

ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ БЫСТРОГО РЕАГИРОВАНИЯ ПРИ УСТАНОВКЕ СИСТЕМ ПОДРУЛИВАНИЯ ЗАДНИХ КОЛЕС

О. А. Пильников

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Данная статья посвящена описанию способов установки систем подруливания задними колесами на автомобили с длинной и удлинённой базами с учетом компоновки автомобиля, типа подвески, усилия, преодолеваемого привороте колеса и некоторых других факторов. Автор приводит технические характеристики автомобилей, описывает технологии подруливания задних колес и приводит расчеты радиуса поворота автомобиля пожарной безопасности без бокового увода колес. Описываемые технологии и расчеты позволяют сделать автомобиль более маневренным в условиях стесненного дорожного пространства, что актуально и экономически выгодно при решении проблемы обеспечения быстрого реагирования в условиях чрезвычайных ситуаций.

The title of the article is "Improving mobility of automobiles rescue by mounting systems of steering the rear wheels."

The text is devoted to questions of modernization steering system in car building industry.

The author discusses about meaning of systems of steering the rear wheels in modern life in cities, analyses technical qualities of automobiles, economical profit. Systems of steering the rear wheels are compared in the second part of the text. One can note that these systems have advantages and disadvantages. The last part of the article informs us about achievements in reduction of radius of turns of automobiles.

Основной задачей автомобилей быстрого реагирования является оперативное и своевременное прибытие к местам их требования, будь то место чрезвычайной ситуации, где в медицинской помощи нуждаются люди, или очаг возгорания, который необходимо погасить либо другая чрезвычайная ситуация. Но в условиях современных городов, которые разрастаются за счет строительства новых инфраструктур и которые перегружены транспортом как общественным, так и частным, это совсем не легкая задача. Рост числа автомобилей и малое количество автомобильных парковок приводят к заторам на проезжей части дороги, занятости правых крайних полос проезжих частей припаркованными автомобилями. Как результат, ширина проезжей части при количестве полос для движе-

ния в одном направлении, равном двум, снижается до 5,8–4,3 м от установленных стандартом по СНиП 2.05.02-85.

Одним из решений данной проблемы является установка систем подруливания задних колес на автомобилях с длинной и удлинненной базами. Для анализа рассмотрим три основных автомобиля пожарной безопасности производимых на территории РФ. Такие как АЦ – 8,0–40 (Урал 4320-0911-30) – 25 ВР, АЦ – 8,0–40 (КАМАЗ 43118) – 54 ВР и АЦ – 6,0–100 (IVECO AMT 633904) – 45 ВР, технические характеристики которых представлены в табл. № 1.

Таблица 1

**Технические характеристики автомобильных цистерн
пожарной охраны**

Технические характеристики	АЦ – 8,0–40 (Урал 4320-0911-30) – 25 ВР	АЦ – 8,0–40 (КАМАЗ 43118) – 54 ВР	АЦ – 6,0–100 (IVECO AMT 633904) – 45 ВР
Габаритные размеры, мм:			
• Длина	9500	9320	9700
• Ширина	2500	2500	2500
• Высота	3200	3350	3300
Колесная база, мм:			
• Автомобиля	5355	4000	5595
• Задней тележки	1600	1320	1390
Углы поворота передних колес (внутреннего/внешнего)	32°/26°	45°/37°	45°/33°
Тип подвески:			
• Передняя	Зависимая на двух продольных полуэллиптических рессорах, работающих совместно с гидравлическими телескопическими амортизаторами двухсто-	Рессорная зависимая	Зависимая, на продольных параболических рессорах с гидравлическими амортизаторами и стабилизатором поперечной устойчивости Зависимая

• Задняя	ронного действия Зависимая на двух полуэллиптических рессорах и подressорниках, работающих совместно с гидравлическими телескопическими амортизаторами двухстороннего действия	Рессорная зависимая	балансирующая с реактивными штангами, на двух продольных полуэллиптических рессорах, со стабилизатором поперечной устойчивости
----------	---	---------------------	--

Существует множество различных устройств и способов подруливания колес. Рассмотрим наиболее распространенные.

1. Технология 4WS (4 Wheel Steer). Данная технология позволяет обеспечить рулевым управлением задние колеса помимо передних. На задней части рамы автомобиля (в случае легковых автомобилей на заднем подрамнике) крепится электромотор, который посредством рулевых тяг приводит в движение ступицы задних колес. Управление производится электронным блоком управления (ЭБУ), который получает информацию от различных датчиков: датчика скорости колес транспортного средства, датчика положения руля, акселерометров, способных различать излишнюю или недостаточную поворачиваемость автомобиля.

2. Замена среднего и заднего мостов на два передних, сохраняя рулевые тяги и рычаги при колесной формуле 6х6 и 6х4.

3. Замена только заднего моста на передний, сохраняя рулевые тяги и рычаги при колесной формуле 6х6 и 6х4.

Но также необходимо учесть условия их применимости, которые зависят от компоновки автомобиля, типа подвески, усилия, преодолеваемого при входе колеса и прочие.

Установка систем 4WS на грузовой автомобиль осложняется модернизацией подвески, требуется установка сложных многорычажных схем подвесок, невозможна передача крутящего момента на колеса без модернизации или полной замены ведущих, неуправляемых мостов. В случае тяжелой пожароохранной техники использование электрического привода осложняется моментом сопротивления колес повороту,

в результате это придется применять ранние версии данной технологии, в которой привод рулевых тяг осуществлялся гидравлически от насоса гидроусилителя руля (ГУР) основной рулевой системы. Управление системой в данном случае осуществляется посредством блока управляющих клапанов гидросистемы, ГУР задних колес, гидравлических аккумуляторов, ЭБУ. Все это приводит к увеличению массы ТС, росту затрат на модернизацию. Следовательно будет целесообразней устанавливать передние мосты вместо среднего и заднего мостов, без изменения в их конструкции. Изменение подвески будет зависеть от ее конструкции в конкретном случае автомобиля.

- АЦ – 8,0–40 (Урал 4320-0911-30) – 25 ВР: основные части всех трех мостов взаимозаменяемы, различия управляемого ведущего моста наблюдаются в конструкции кожуха полуосей и агрегатов устанавливаемых после полуосей. В итоге имеется возможность установки двух передних мостов на заднюю телегу грузовика с управляемым проходным средним мостом. Возможно обойтись без изменения конструкции задней подвески, но с изменением рулевых тяг и рычагов, т. к. углы поворота подруливающих колес значительно меньше углов поворота передних управляемых колес.

- АЦ – 8,0–40 (КамАЗ 43118) – 54 ВР: передний мост отличается от двух других по конструкции картеров, главных передач, что не позволяет нам сделать средний проходной мост. Решить данную проблему можно двумя способами: изменить конструкцию картера моста и главной передачи, либо подводить карданный валы к каждому ведущему мосту по отдельности, по принципу осуществленному на грузовых автомобилях ЗИЛ-157, КрАЗ-255Б. Модернизация подвески зависит от углов поворота подруливающих колес.

- АЦ – 6,0–100 (IVECO АМТ 633904) – 45 ВР: работы по установке подруливающих мостов аналогичны АЦ – 8,0–40 (КамАЗ 43118) – 54 ВР.

Определим радиусы поворота у автомобилей прототипов. Общая схема поворота трехосного автомобиля при качении без бокового увода колес изображена на рис. 1.

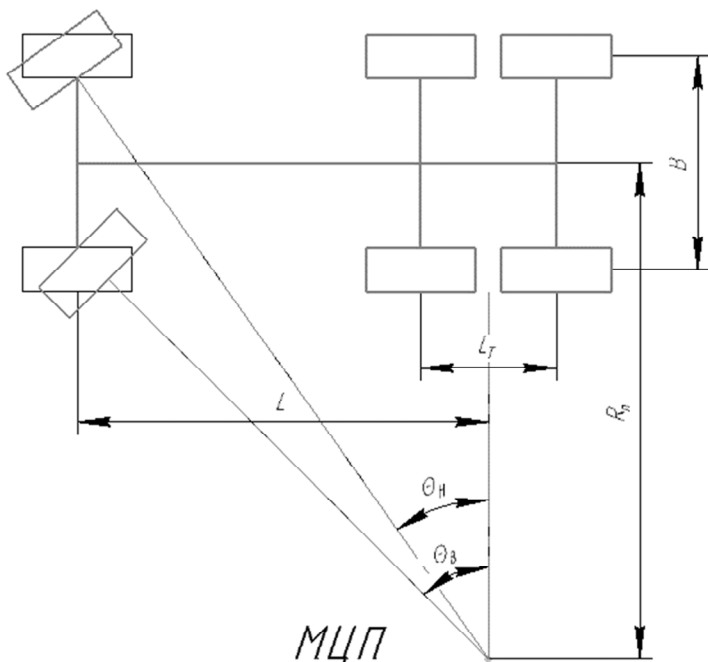


Рис. 1. Схема поворота трехосного автомобиля при качении без бокового увода колес

Определим радиусы поворота рассматриваемых автомобилей без бокового увода колес [1]:

$$R_n = \frac{L}{\operatorname{tg} \theta} . \quad (1)$$

Урал 4320-0911-30:

$$R_n = \frac{5355}{\operatorname{tg} \frac{32^\circ + 26^\circ}{2}} = 9660 \text{ мм} = 9,66 \text{ м}.$$

КАМАЗ 43118:

$$R_n = \frac{4000}{\operatorname{tg} \frac{45^\circ + 37^\circ}{2}} = 4601 \text{ мм} = 4,601 \text{ м}.$$

IVECO AMT 633904:

$$R_{\pi} = \frac{5595}{\operatorname{tg} \frac{45^{\circ} + 33^{\circ}}{2}} = 6909 \text{ мм} = 6,909 \text{ м.}$$

Сведем результаты расчета радиусов поворота автомобилей прототипов в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета радиусов поворота автомобилей прототипов

Показатель	Урал 4320-0911-30	КамАЗ 43118	IVECO AMT 633904
Радиус поворота, м	9,660	4,601	6,909

Для определения углов поворота подруливающих колес зададимся углами поворота управляемых и подруливающих колес при установки подруливающего механизма на средний и задний мост, исходя из условия неизменности конструкции подвески рассматриваемого прототипа. Как результат, углы поворота подруливающих колес будут меньше углов поворота передних управляемых колес. Общая схема поворота трехосного автомобиля при качении без бокового увода колес с задними подруливающими колесами изображена на рис. 2, имея в виду то, что наружный и внутренний угол поворота колес среднего моста малы, на схеме эти углы не отображены.

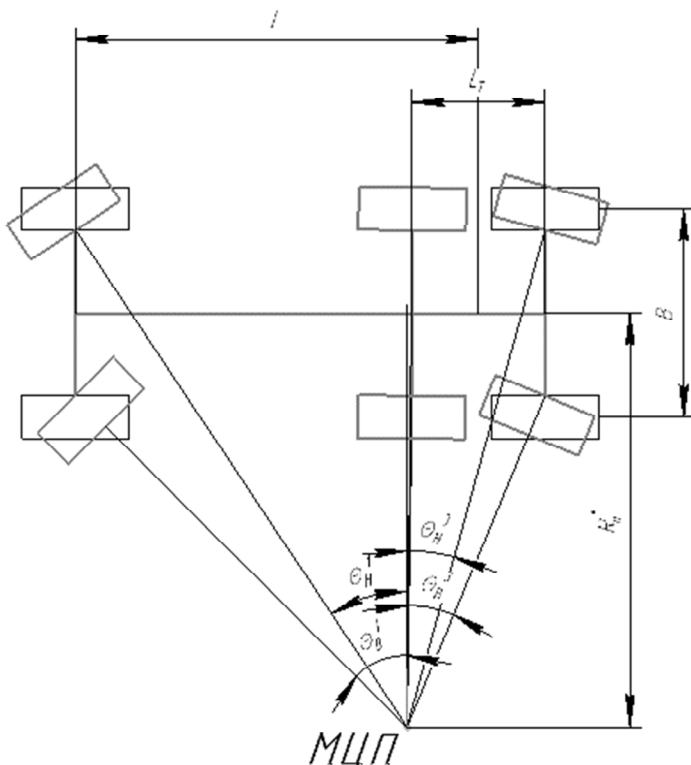


Рис. 2. Схема поворота трехосного автомобиля при качении без бокового увода колес с задними подруливающими колесами

Значения углов поворота подруливающих колес автомобилей прототипов приведены в табл. 3.

Таблица 3
Значения углов поворота подруливающих колес автомобилей прототипов

Углы поворота колес (внутреннего/внешнего)	Урал 4320-0911-30	КамАЗ 43118	IVECO AMT 633904
Θ_{B1}/Θ_{H1}	$31^{\circ}5'/26^{\circ}3'$	$45^{\circ}/33^{\circ}4'$	$44^{\circ}31'/33^{\circ}41'$
Θ_{B2}/Θ_{H2}	$1^{\circ}13'/1^{\circ}$	$1^{\circ}2'/1^{\circ}$	$1^{\circ}34'/1^{\circ}$
Θ_{B3}/Θ_{H3}	$12^{\circ}1'/9^{\circ}6'$	$22^{\circ}4'/15^{\circ}3'$	$23^{\circ}13'/16^{\circ}13'$

Определим радиус поворота автомобиля без бокового увода колес с системой подруливания [2]:

$$R_{\Pi}^* = \frac{L}{\sum_1^3 tg\theta_i} \cdot \tag{2}$$

Урал 4320-0911-30:

$$R_{\Pi}^* = \frac{5355}{tg\frac{31^{\circ}5' + 26^{\circ}3'}{2} + tg\frac{1^{\circ}13' + 1^{\circ}}{2} + tg\frac{12^{\circ}1' + 9^{\circ}6'}{2}} = 7138 \text{ мм.}$$

$$= 7.138 \text{ м}$$

КамАЗ 43118:

$$R_{\Pi}^* = \frac{4000}{tg\frac{45^{\circ} + 33^{\circ}4'}{2} + tg\frac{1^{\circ}2' + 1^{\circ}}{2} + tg\frac{22^{\circ}4' + 15^{\circ}3'}{2}} = 3436 \text{ мм.}$$

$$= 3,436 \text{ м}$$

IVECO AMT 633904:

$$R_{\Pi}^* = \frac{5595}{tg\frac{44^{\circ}31' + 33^{\circ}41'}{2} + tg\frac{1^{\circ}34' + 1^{\circ}}{2} + tg\frac{23^{\circ}13' + 16^{\circ}13'}{2}}$$

$$= 4688 \text{ мм} = 4,688 \text{ м}$$

Сведем результаты расчета радиусов поворота автомобилей прототипов с устройством подруливания задних колес в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета радиусов поворота автомобилей прототипов с устройством подруливания задних колес

Показатель	Урал 4320-0911-30	КамАЗ 43118	IVECO AMT 633904
Радиус поворота, м	7,138	3,436	4,688

Составим обобщающую таблицу со значениями радиусов поворота до и после модернизации, чтобы оценить полученный эффект в повышении маневренности. Данные сведены в табл. 5.

Таблица № 5

**Оценка эффективности проведенной модернизации
автомобилей прототипов**

Оценочные показатели	Урал 4320-0911-30	КамАЗ 43118	IVECO AMT 633904
R_{Π}	9660	4601	6909
R^*_{Π}	7138	3436	4688
Улучшение показателей	26,1 %	25,3 %	32,2 %

Как видно из данных таблицы, даже при малых углах поворота подруливающих колес среднего ведущего моста, средних углах поворота подруливающих колес заднего ведущего моста и стандартной подвеске автомобиля прототипа, радиус поворота снизился более чем на 20 %. Учитывая возможность замены подвески, можно получить конструкцию, позволяющую поворачивать подруливающие колеса на большие углы. Достижение наибольшего эффекта снижения радиуса поворота автомобилей с длинной и удлиненной базами при углах поворота подруливающих колес заднего моста равным углом поворота передних управляемых колес. В результате возможно достичь уменьшения радиуса поворота до 50 %, что в итоге приведет к повышению оперативности работы служб быстрого реагирования.

-
1. Тарасик В. П. Теория движения автомобиля : учебник для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 478 с.
 2. Чайковский И. П., Саломатин П. А. Рулевые управления автомобилей. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РУКОПИСНЫХ ЦИФР В ПРИЛОЖЕНИЯХ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Е. А. Попко, И. А. Вайнштейн

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Предложен метод распознавания рукописных цифр на основе математического моделирования сверточной нейронной сети. Для повышения качества идентификации в систему интегрирован логический модуль, основанный на структурном методе распознавания и позволяющий корректировать выходной результат нейронной сети. Эксперименты показали, что предложенный подход позволяет достигать высокой точности распознавания 97,23 %.

The method for recognizing handwritten digits based on the modeling of convolutional neural network was presented. The integrated logic module based on a structural approach was developed. Used system architecture adjusted the output of the neural network to improve quality of symbol identification. It was shown that proposed algorithm was flexible and high recognition rate of 97,23 % was achieved.

Машинное зрение активно применяется в технологических производственных задачах для автоматического контроля продукции и оборудования, построения систем безопасности, учета и др. [1, 2]. Распознавание рукописных символов применяется в анализе и классификации документов, автоматической фиксации серийных номеров изделий, идентификации транспортных средств. В части работ по распознаванию символов цифр в качестве тестовой задачи рассматривается распознавание базы данных рукописных цифр MNIST [3, 4]. Перспективным подходом для решения такой задачи представляется использование эволюционных алгоритмов [5, 6, 7]. На текущий момент наилучшие результаты удается получить с помощью математического моделирования так называемых сверточных нейронных сетей (СНС) и их модификаций, заключающихся в создании комитетов сетей или усложнении их внутренней архитектуры [3, 4, 8]. В данной работе для распознавания рукописных цифр предлагается модификация сверточной нейронной сети с помощью интеграции в ее структуру логического корректирующего модуля. Данный механизм применяется для корректировки результатов классификации.

Традиционные методы распознавания символов могут быть разделены на три основных типа: шаблонные, структурные и признаковые [9]. Следует учитывать, что каждый класс имеет и преимущества, и ограничения (табл. 1). В настоящее время наиболее активно развиваются алгоритмы классификации, основанные на стратегии обучения на примерах [10]. К ним относятся искусственные нейронные сети и метод опорных векторов.

Таблица 1

Основные классы методов распознавания

Методы	Преимущества	Недостатки
Шаблонные	Высокая скорость, возможность работы при наличии дефектов символов, устойчивость к шумам	Малая универсальность, невозможность распознать шрифт, отличающийся от заложенного в систему
Структурные	Не важен размер и шрифт	Сложность распознавания символов с дефектами, относительно медленная работа
Признаковые методы	Хорошая обобщающая способность, устойчивость к изменениям формы символов	Неустойчивость к различным дефектам, потеря части информации

Поскольку стандартные варианты нейронных сетей, как правило, показывают ограниченные возможности распознавания символов, был предложен новый тип – сверточные нейронные сети [3]. СНС представляют собой развитие многослойного линейного персептрона, оптимизированного для двумерных задач распознавания образов, таких как идентификация символов и обнаружение лиц. Основным архитектурным отличием является наличие слоев нейронов разного типа и назначения. СНС комбинируют три архитектурные идеи: локальные рецептивные области для извлечения элементарных признаков на изображении; общие веса для извлечения одинакового набора элементарных признаков из всего входного изображения и для уменьшения вычислительных затрат; локальное усреднение и подвыборка, для уменьшения разрешения для карт извлекаемых признаков [3]. Указанный подход обеспечивает инвариантность анализа образов к сдвигу, масштабу и искажениям.

В качестве прототипа в работе используется архитектура сети [4]. Основным отличием данной реализации является использование во втором слое шести карт признаков вместо пяти. Общая функциональная схема СНС приведена на рис. 1. На входной слой подаются изображения распознаваемых символов. Далее следует сверточный слой из 6 карт

признаков размером 13×13 . Каждый элемент карты соединен с рецептивным полем 5×5 на входном изображении. Далее расположен дополнительный сверточный слой, состоящий из 50 карт размером 5×5 . Следующий слой является полносвязным и содержит 100 нейронов. Шестой слой содержит нейроны, соответствующие цифрам от 0 до 9.

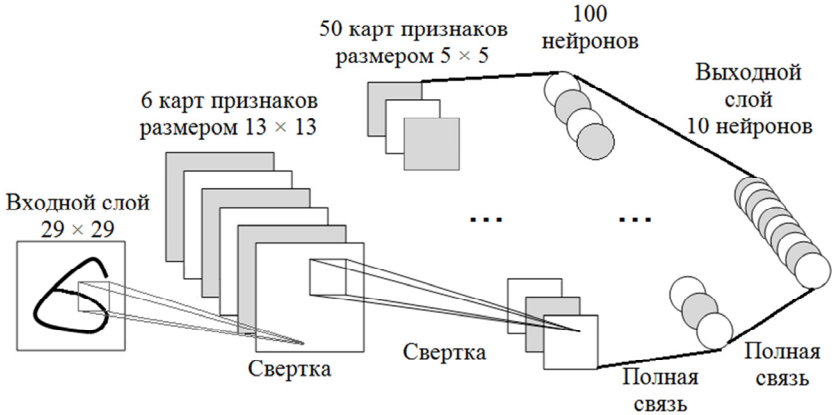


Рис. 1. Используемая архитектура нейронной сети

Веса связей сверточных нейронов, расположенных в одной карте признаков, используются совместно и положение локального признака становится менее важным. Такой прием позволяет добиться инвариантности к сдвигу. Выходные значения нейронов Y_n^l карты признаков n сверточного слоя l вычисляются следующим образом:

$$Y_n^l(x, y) = f \left(\sum_{m \in M_n^l} \sum_{i=0}^{K^l-1} \sum_{j=0}^{K^l-1} \omega_{mn}^l(i, j) \cdot Y_m^{l-1}(x+i, y+j) + b_n^l \right), \quad (1)$$

где x, y – координаты нейрона внутри карты признаков; M_n^l – множество карт признаков предыдущего слоя $l-1$, которые связаны с картой признаков n слоя l ; ω_{mn}^l – матрица синаптических коэффициентов (ядро свертки); K^l – размер рецептивной области нейронов l -го слоя; b_n^l – нейронное смещение n -й карты признаков l -го слоя [3].

В качестве активационной функции $f(z)$ нейросети применяется выражение для масштабированного гиперболического тангенса:

$$f(z) = A \tanh(Sz), \quad (2)$$

где z – входное значение, соответствующее значению активации нейрона; A и S – параметры функции. В работе предложено использовать значения $A = 1,7159$, $S = 2/3$ [3].

Настройка нейронной сети в настоящей работе производится по стандартному алгоритму обратного распространения ошибки. В качестве данных для обучения и тестирования применяется набор изображений рукописных цифр базы MNIST [4].

Как показали проведенные предварительные испытания, основной проблемой СНС при классификации является различение разрывов в характерных областях символов и отдельных структурных элементов. При пропуске этих признаков и возникают приведенные ошибки сети (рис. 2). Например, в случае, когда символ «2» был некорректно идентифицирован как «7», нейронная сеть не смогла определить, соответствует ли нижний элемент символа в виде черты двойке или семерке (см. образец 321 на рис. 2).

32	44	58	71	122	12	15	173
1	9	2	6	6	99	30	7
2=	3=	8=	1=	7=>	5=	8=	5=>
>7	>5	>2	>7	2	>7	>7	3
17	19	21	30	420	44	46	474
82	01	30	62	1	97	99	0
8=	9=	4=	8=	1=>	8=	6=	3=>
>9	>4	>9	>3	7	>7	>1	5
51	56	60	65	725	84	85	966
76	54	42	71	9	08	20	9
8=	7=	5=	9=	8=>	8=	4=	4=>
>4	>2	>9	>7	7	>5	>9	7

Рис. 2. Примеры изображений неверно распознанных символов
Сверху рукописной цифры – № п.п. в тестовой базе данных MNIST;
снизу – «искомое значение» => «результат распознавания»

В структуру системы был введен логический модуль коррекции результатов. Основным его предназначением является устанавливать наличие определенных структурных элементов для символов и выдавать поправочное штрафное значение для выходов нейронной сети. В составе логического модуля находится база данных правил выработки поправочных значений. Каждое правило, может быть представлено в виде кортежной модели: $P = \langle Name, Alg, Outs, Val \rangle$, где *Name* – название правила; *Alg* – алгоритм определения наличия элемента; *Outs* – множество выходов нейронной сети, к которым применяется поправка; *Val* – величина поправки.

Например, для более надежной идентификации символов «2» и «7» правило формулируется следующим образом: $P_1 = \langle \text{«коррекция для символа 7»}, \text{«алгоритм, определяющий соответствие нижнего элемента (черты) цифре «7» или «2»}, \{7\}, -0,5 \rangle$. В данном случае штраф –0,5 применяется к выходному нейрону сети, отвечающему за цифру «7», если внизу символа установлено наличие горизонтальной подчеркивающей черты достаточного размера, соответствующей цифре «2».

Для тестирования разработан программный модуль на языке C++ с использованием библиотеки технического зрения OpenCV, реализующий предложенный метод распознавания. Проверка работоспособности системы выполнялась сначала на обучающем множестве (60 000 символов), а затем на тестовом наборе (10 000 образцов). Работа программы проверялась как с использованием логического модуля коррекции, так и без него (только нейронная сеть). Результаты исследования обеих программных реализаций приведены табл. 2.

Таблица 2

Результаты распознавания

Реализация	Точность распознавания обучающей выборки	Точность распознавания тестовой выборки
Исходная СНС	97,35 %	99,17 %
С модулем корректировки	99,10 %	99,23 %

В ходе тестирования установлено, что система с модулем корректировки позволяет повысить качество распознавания. По сравнению с первой реализацией удалось корректно распознать цифры из тестовой выборки с номерами 321, 1299, 1530, 5654, 7259, 9669 (рис. 2). Достигаемая точность распознавания разработанной гибридной системы составляет 99,23 %, что является хорошим результатом [11].

Таким образом, реализация корректирующего логического модуля позволяет повысить уровень распознавания системы. Применение сверточных нейронных сетей представляется достаточно мощным инструментом распознавания благодаря возможности их интеграции в гибридные системы технического зрения с различными методиками. Дальнейшая работа может быть направлена на создание методики обучения сети, тонкую настройку ее весов и развитие оптимальной структуры.

1. *Davies E. R.* Computer and Machine Vision, Fourth Edition: Theory, Algorithms, Practicalities. Waltham, USA: Academic Press, 2012. 912 p.
2. *Bishop C. M.* Pattern Recognition and Machine Learning. New York: Springer, 2006. 740 p.
3. *LeCun Y.* Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition // Proceedings of the IEEE. 1999. Vol. 86, Nr 11. P. 2278–2324.
4. *Simard P.Y., Steinkraus D., Platt J.C.* Best Practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis // Document Analysis and Recognition. Proceedings. Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition. 2003. P. 958–963.
5. *Majida Ali Abed, Ahmad Nasser Ismail, Zubadi Matiz Nahi.* Pattern Recognition Using Genetic Algorithm // International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2010. Vol. 2, Nr 3. P. 583–588.
6. *Weinstein I. A., Popko E. A.* Genetic synthesizing of band schemes for thermoluminescence in dosimetric crystals // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43, Nr 2–6. P. 218–221.
7. *Weinstein I. A., Popko E. A.* Genetic search for model parameters in fitting thermoluminescence curves // Technical Physics Letters. 2006. Vol. 32, Nr 6. P. 534–537.
8. *Попко Е. А., Вайнштейн И. А.* Применение сверточной нейронной сети для распознавания рукописных символов // Научно-техн. вестн. Поволжья. 2013. № 4. С. 223–225.
9. *Афонасенко А. В., Елизаров А. И.* Обзор методов распознавания структурированных символов // Доклады ТУСУР. Ч. 1. 2008. № 2 (18). С. 83–88.
10. *Liu C., Fujisawa H.* Classification and Learning for Character Recognition: Comparison of Methods and Remaining Problems // Int. Workshop on Neural Networks and Learning in Document Analysis and Recognition. 2005. Vol. 90. P. 139–161.
11. *Thom M., Palm G.* Sparse Activity and Sparse Connectivity in Supervised Learning // J. of Machine Learning Research. 2013. Vol. 14. P. 1091–1143.

О ПРИМЕНЕНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ЭКСПЕРИМЕНТА НА ПРИМЕРЕ СВАИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

А. А. Пургин

Уральский федеральный университет, Екатеринбург,

В работе рассмотрена возможность применения нейронных сетей для прогнозирования эволюции сложных нелинейных систем на примере системы «свая – основания», находящейся под действием статической нагрузки.

The paper considers the possibility of using neural networks to predict the evolution of complex nonlinear systems by the example of the "pile-foundation" under static load.

В строительной практике часто возникает необходимость в определении фактической несущей способности грунта основания под уже погруженной свайей. Сложность математической модели основания сваи еще больше осложняется обычно скромными данными о его составе, характеристиках, а также его неоднородностью и возможным включением так называемых «линз», точное определение расположения которых в настоящее время ведет к значительному росту стоимости инженерно-геологических работ. Вышеозначенные трудности ведут к необходимости проведения так называемых натурных испытаний свай. Одним из наиболее распространенных натурных методов определения несущей способности основания сваи является загрузка сваи статической нагрузкой. Испытание статической нагрузкой наиболее приближенно к реальному условию работы сваи в системе «свая – основание» и позволяет определить несущую способность основания с высокой точностью.

Сущность сваи испытания статической нагрузкой заключается в создании на ее оголовке не динамического усилия и наблюдением за осадкой сваи при этом усилии. Осадка сваи представляет собой некоторую функцию u , зависящую от величины приложенного усилия P и времени t . Зависимость осадки от времени заключается в наличии некоторого переходного процесса в работе сваи, иными словами в некотором промежутке времени, в рамках которого свая переходит из одного состояния в другое с последующей стабилизацией.

Формально задачу определения несущей нагрузки можно выразит как

$$u(P) \leq u_c, \quad (1)$$

где u_c – некоторая критическая осадка, м.

Однако этого условия недостаточно. Фактически истощение несущей способности сопровождается быстрым скачком осадки, поэтому к данному условию нужно добавить условие роста осадки во времени, но для простоты ограничимся только условием (1). В данных терминах поиск несущей способности можно свести к решению следующего уравнения

$$\varphi = u - u_c = 0, \forall t.$$

Из-за специфики работы изучаемой системы, а именно возможное истощение несущей способности с возникновением остаточных деформаций, такие методы решения нелинейных уравнений как «бинарный поиск» и различные вариации метода Ньютона не пригодны. Поэтому единственный способ решения данного уравнения заключается в дискретизации возможного диапазона значений усилия P . Таким образом, определяемая величина P может быть найдена как P_{i-1} , где P_i – усилие при котором произошло истощение несущей способности.

Следовательно, сваю необходимо загружать ступенями. Как было сказано ранее, поведение сваи под действием нагрузке содержит в себе некоторый переходный процесс, который в дальнейшем мы будем называть процессом стабилизации осадки. Длительность процесса стабилизации варьируется и может достигать несколько часов, что можно увидеть на рис. 1.

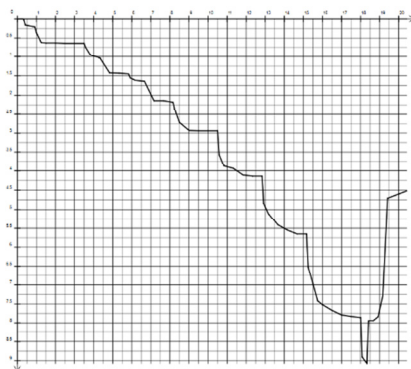


Рис. 1. Характерный график зависимости осадки сваи от времени испытания. Скачки соответствуют новым ступеням загрузки, вертикальная ось – осадка, мм; горизонтальная – время, ч

На рис. 1 видно, что время натурных испытаний методом статического вдавливания весьма продолжительно и составляет в данном случае 20 ч. Фактически оно может достигать 30 ч, что и определяет основную сложность данного метода.

На рис. 1 видно, что функция осадки u , является кусочно-гладкой. В рамках одной ступени она является непрерывной с убывающей до нуля производной, что и означает стабилизацию.

Зная вид функции u , можно определить поведение свай. К сожалению нахождение ее вида является сложной нелинейной многофакторной задачей. Поэтому поиску точного аналитического выражения мы предпочтем применению аппроксимации.

Нелинейность и многофакторность модели «сваяоснования» не позволяют применять классические методы аппроксимации для ее описания. Тем не менее ее аппроксимация возможна при помощи многослойных нейронных сетей, в частности персептроном Румельхарта.

Одно из основных преимуществ нейронных сетей – это возможность определения скрытых зависимостей между данными, что делает возможным применение их для описания сложных многофакторных нелинейных моделей с неявной связью между параметрами.

Персептрон Румельхарта представляет из себя систему из входных, выходных и скрытых слоев, связанных между собой искусственных нейронов. Каждый искусственный нейрон содержит в себе вектор входных сигналов \bar{X} и вектор весов \bar{W} .

Скалярное умножение вектора весов \bar{W} на вектор входных сигналов \bar{X} дает аргумент s для некоторой активационной/передаточной функции $f(s)$, результат которой является ответом искусственного нейрона, который передается на вход для искусственных нейронов следующего слоя. Характерны вид типичной нейронной сети представлен на рис. 2.

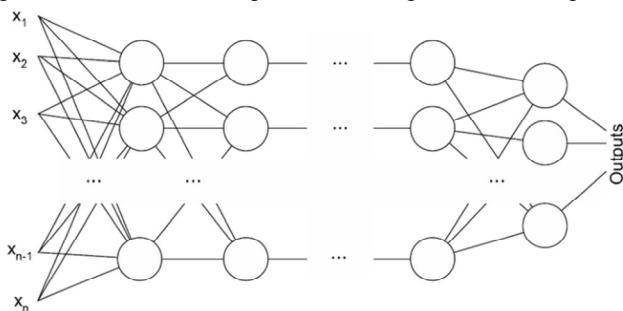


Рис. 2. Характерный вид типичной нейронной сети

Функция, будучи представленная в виде персептрона, позволяет проводить значительно более качественную экстраполяцию своих значений и пригодна для анализа эволюции сложных нелинейных многофакторных моделей, таких как модель «свая – основание».

Ключевым моментом в применении нейронных сетей является так называемое «обучение» нейронной сети, которое заключается в определении векторов весов \vec{W} для каждого искусственного нейрона сети. Существует два основных метода обучения нейронной сети. В нашем случае применим метод обучения по известным выходным данным, известный также как метод обучения с учителем. Сущность данного метода заключается в определении таких векторов весов \vec{W} , чтобы выполнялось равенство между выходными данными нейронной сети и ожидаемыми выходными данными при общих для них входными данными.

Для проведения корректировки векторов весов искусственных нейронов нейронной сети часто применяется метод обратного распространения ошибки, заключающегося в распространении сигналов ошибки от выходов сети к ее входам, в направлении, обратном прямому распространению сигналов в обычном режиме работы [4]. По своей сути это модифицированный метод градиентного спуска.

Исследования по применению персептрона для аппроксимации функций показывают, что средняя ошибка обученной сети составляет около 4 %, что является приемлемым для инженерных расчетов. При этом чем больше исходное множество для обучения нейронной сети, тем более точный результат она дает

Применение персептрона теоретически позволит уже на первых этапах нагружения определить фактическую несущую способность сваи, что приведет к значительному снижению общего времени проведения испытания и, соответственно, себестоимости испытания.

Таким образом мы имеем следующие преимущества применения искусственных нейронных сетей для прогнозирования результатов испытания:

1. Уменьшение трудоемкости испытания за счет снижения его общего времени.
2. Возможность изучения зависимости осадки от произвольных факторов.
3. Инженеру не требуется учет всех факторов. Факторы учитываются самим персептроном как условие когерентности его данных.
4. Обучение нейронной сети относительно просто реализуется на ЭВМ.

5. Алгоритм работы персептрона представляет собой последовательность независимых в рамках одного слоя матричных операций, что ведет к хорошему его распараллеливанию между процессорами.

Очевидными недостатками являются:

1. Ресурсоемкость вычислений – искусственная нейронная сеть может состоять из огромного числа узлов.
2. До ввода персептрона в эксплуатацию необходимо обучить его на большом количестве примеров.
3. Обслуживание искусственной нейронной сети требует высокую математическую подготовку у ее оператора.

Дополнительным преимуществом применения нейронных сетей для прогнозирования результата экспериментом является возможность адаптации их для произвольных задач, к примеру, для определения временного сопротивления стали и других характеристик материалов, систем. Различие между видами испытания будут различаться лишь в выборе входных данных и в данных для обучения.

В дальнейшем мы планируем построить такую искусственную нейронную сеть на базе архивных данных статических испытаний института УралНИАС.

-
1. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.: «Мир», 1992.
 2. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. 2-е изд-е. М.: «Вильямс», 2006. С. 1104 с.
 3. *Минский М., Пейперт С.* Персептроны. М.: Мир, 1971. 261 с;
 4. *Барцев С. И., Гилев С. Е., Охонин В. А.* Принцип двойственности в организации адаптивных сетей обработки информации // Динамика химических и биологических систем. Новосибирск: Наука, 1989. С. 6–55.

ПОВРЕЖДЕННОСТЬ МЕТАЛЛА ПРИ ФОРМОВКЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ЛИСТА

Н. В. Семенова, В. С. Паршин

Уральский федеральный университет, Екатеринбург,

Изучены вопросы поврежденности металла при формовке гнутых профилей из листа. Показано, что в имеющейся литературе напряженное состояние металла не учитывается. Разработана методика определения напряженного состояния при формовке и предложен алгоритм расчета поврежденности при особых случаях профилирования и, в частности, при наложении сжимающих напряжений в калибре, что значительно повышает пластичность металла. Приведен пример расчета поврежденности при формовке с использованием листа из сплава титана VT1-0.

Research of issues about damage of metal during forming of the bent sheet profiles. It has been shown, that in the literature the stress state of the metal is not considered. A method for determining the state of stress during molding was developed, and an algorithm for calculating the damage in special cases, profiling and, in particular, during applying compressive stress in the gauge, which significantly increases the ductility of the metal, was offered. An example shows calculation of damage during molding using a sheet of titanium alloy VT1-0.

Гнутые профили проката позволяют при их использовании значительно снизить удельный расход металла, трудоемкость изготовления машин и сооружений, повысить их эксплуатационные характеристики и расширить возможность создания рациональных конструкций. Поточный и непрерывный характер технологических процессов производства гнутых профилей создают условия для широкой механизации и автоматизации операций.

В настоящее время сортамент гнутых профилей непрерывно расширяется как по их типоразмерам, так и по применению новых высокопрочных материалов. Следует отметить, что в последнем случае пластичность металла понижена.

Процесс формовки профильной трубы из листа может быть представлен с некоторыми допущениями в виде модели чистого изгиба, при этом не учитываются деформации, происходящие в межклетевых промежутках [1].

Рассматривая чистый изгиб листа (рис. 1) при больших деформациях [2], принято, что деформация листа в направлении, перпендикулярном плоскости изгиба равна нулю

$$\varepsilon_z=0 \quad (1)$$

и все сечение находится в пластическом состоянии.

Рассмотрим среду с линейным упрочнением в виде:

$$\sigma_s=\sigma_{s0}+\Pi\varepsilon_l, \quad (2)$$

где σ_{s0} – исходное значение предела текучести;

Π – модуль упрочнения, являющийся тангенсом угла наклона касательной кривой упрочнения к оси абсцисс;

ε_l – интенсивность деформации.

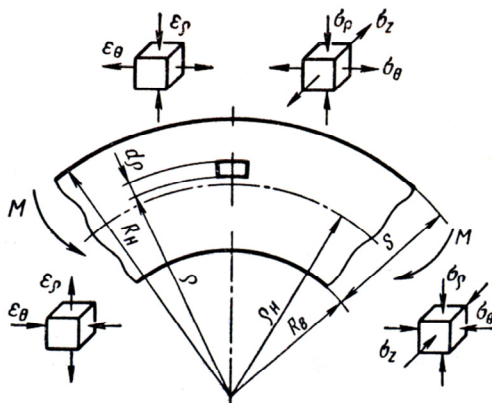


Рис. 1. Схема процесса деформации при изготовлении гнутых профилей

При технологических расчетах переходов и создании калибровки инструмента важно знать запас пластичности подката. К. Н. Богоявленский и А. К. Григорьев условие профилирования металла без появления трещин записали в виде:

$$q = \delta_s/\varepsilon_H > [q] = 1 \quad (3)$$

где q – запас пластичности металла;

δ_s – относительное удлинение при испытании на растяжение;

ε_H – максимальная степень деформации нагруженных волокон в месте изгиба.

При расчете запаса пластичности, следовательно, предполагается, что напряженно-деформированные состояния при профилировании и растяжении образца идентичны.

Следует иметь в виду, что в величину относительного удлинения, полученную из опытов на растяжение, кроме устойчивой равномерной пластической деформации, входит также сосредоточенная деформация в шейке. При назначении режимов изгиба пластичность металла следует оценивать по способности к равномерной пластической деформации. Для большинства металлов равномерная деформация составляет 50–55 % общей деформации. Поэтому для практических расчетов вводят еще некоторый поправочный коэффициент, достигающий значения 2.

В практике профилирования могут встретиться такие случаи, когда напряженно-деформированное состояние металла существенно отличается от такового при растяжении образцов. Одним из методов повышения пластичности в местах изгиба при профилировании является наложение сжимающих тангенциальных напряжений (рис. 2), применение которых особенно важно для материалов с повышенными механическими свойствами. Сжатие в местах изгиба может быть получено на основе создания соответствующих калибровок валков или быть результатом трения заготовки о валки.

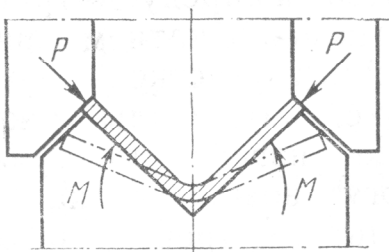


Рис. 2. Схема подгибки с применением тангенциально сил сжатия

Таким образом, наложение сжимающего напряжения приводит, в сравнении с чистым изгибом, к изменению гидростатического давления.

В УрФУ разработан аппарат расчета использования запаса пластичности ω , учитывающий напряженное состояние, причем выражение для этой величины записано в виде [3]:

$$\omega = \omega_0 + \sum_{i=1}^n \int_0^{\lambda_i} \frac{d\lambda}{\lambda_p} - \Delta\omega, \quad (4)$$

где ω_0 – исходная поврежденность металла до рассматриваемого акта пластической деформации; $\Delta\omega$ – поврежденность, устранимая термообработкой; n – число циклов деформации; λ_p – степень деформации до разрушения при заданном напряженном состоянии.

Для реализации формулы (4) следует вычислять степень деформации, накопленную частицей на всем пути деформирования. Особый интерес представляет величина λ_p , определение которой возможно пока только из экспериментов. Они могут быть аппроксимированы, например, зависимостью [4]:

$$\lambda_p = [\chi_2 - (\chi_1 - \chi_2)\mu_\sigma] \exp[\lambda_2 - (\lambda_1 - \lambda_2)\mu_\sigma] \frac{\sigma}{T}, \quad (5)$$

Где $\chi_1, \chi_2, \lambda_1, \lambda_2$ – коэффициенты, соответствующие опытам при $\mu_\sigma = -1$, и $\mu_\sigma = 0$.

Таким образом, из решения краевой задачи определяются параметры напряженно-деформированного состояния, вычисляется λ_p , и ω , которое выбирается из диапазона $\omega^* < \omega \leq 1$.

Определение степени использования запаса пластичности в работе выполнено для двух моделей: профилирование круглой трубы в многогранную в профильной волоке и формовка профильных труб из листа с наложением сжимающих или растягивающих напряжений по контуру изгибаемого профиля. Отметим, что в процессе расчета следует выявить наиболее опасные с точки зрения вероятности разрушения точки и параметрический анализ выполнять именно для них.

Для расчета степени использования запаса пластичности за переход при формовке профильных труб следует найти напряженно-деформированное состояние металла в этом процессе, определить на этой основе гидростатическое давление и параметр Лоде, по кривой пластичности вычислить предельную пластичность и найти ω_i . Поскольку формовка ведется в несколько проходов, то суммарная степень использования запаса пластичности будет

$$\omega_\Sigma = \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad (6)$$

где n – число переходов при формовке.

Выражение для гидростатического давления в рассматриваемой задаче имеет вид:

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_\theta + \sigma_\rho + \sigma_z), \quad (7)$$

В теории профилирования принимается, что деформация листа в направлении, перпендикулярном плоскости изгиба, равна 0, т. е. $\varepsilon_z = 0$.

Приращения пластических деформаций связаны с напряжениями зависимостями

$$\begin{aligned} d\varepsilon_\rho &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_\rho - \sigma), \\ d\varepsilon_\theta &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_\theta - \sigma), \\ d\varepsilon_z &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_z - \sigma); \end{aligned} \quad (8)$$

где $d\varepsilon_i$ – приращение интенсивности пластических деформаций.

На основании (1) заключаем $d\varepsilon_z = 0$, тогда из (8) получим $\sigma_z = \sigma$.

В результате из выражения (7) имеем

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_\theta + \sigma_\rho), \quad (9)$$

Тогда интенсивность деформаций в этом процессе

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_\theta - \sigma_\rho), \quad (10)$$

В случае наложения тангенциальных сжимающих напряжений их действие согласно работе [5] учитывается в формулах для напряжений σ_θ и σ_ρ .

Решения для напряжений σ_θ и σ_ρ получены в литературе [5] на основе модели линейного упрочнения. Ранее упрочнение учтено в виде степенной зависимости, из которой можно получить модуль упрочнения в виде

$$\Pi = \frac{d\sigma_s}{d\lambda_i} = gb\lambda_i^{b-1}, \quad (11)$$

Тогда выражения для напряжений на основе работы [6] можно записать, например, для зоны растяжения в виде

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= \left(\sigma_{s0} + \frac{gb\lambda_i^{b-1}}{2} \ln \frac{\rho R_H}{\rho_H^2} \right) \ln \frac{R_H}{\rho}; \\ \sigma_\theta &= \left[\sigma_{s0} \left(1 - \ln \frac{R_H}{\rho} \right) + \frac{gb\lambda_i^{b-1}}{2} \left(2 \ln \frac{\rho}{\rho_H} - \ln \frac{\rho R_H}{\rho_H^2} \ln \frac{R_H}{\rho} \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Подобные формулы можно записать и для зоны сжатия.
Выражение для параметра Лоде

$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (13)$$

Имея в виду, что $\sigma_1 = \sigma_{\theta}$, $\sigma_2 = \sigma_z$ и $\sigma_3 = \sigma_{\rho}$, получим $\mu_{\sigma} = 0$.

Учитывая (9), а также принимая условие пластичности в форме Мизеса

$$T = \tau_s, \quad (14)$$

получаем для показателя напряженного состояния выражения

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma}{T}\right)_i &= \frac{\sqrt{3}}{2} [\sigma_{s_i} \left(1 - \ln \frac{R_H}{\rho}\right) + \frac{1}{2} bg \lambda_i^{b-1} \left(2 \ln \frac{\rho}{\rho_H} - \ln \frac{R_H \rho}{\rho_H} \ln \frac{R_H}{\rho}\right) - \\ &- \left(\sigma_{s_i} + \frac{1}{2} bg \lambda_i^{b-1} \ln \frac{R_H \rho}{\rho_H^2}\right) \ln \frac{R}{\rho}] \sigma_{s_i}^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

— для зоны растяжения.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma}{T}\right)_i &= -\frac{\sqrt{3}}{2} [\sigma_{s_i} \left(1 + \ln \frac{\rho}{r_B}\right) + \frac{1}{2} bg \lambda_i^{b-1} \left(2 \ln \frac{\rho_H}{\rho} + \ln \frac{\rho_H^2}{\rho \cdot r_B} \ln \frac{\rho}{r_B}\right) + \\ &+ \left(\sigma_{s_i} + \frac{1}{2} bg \lambda_i^{b-1} \ln \frac{\rho_H^2}{\rho \cdot r_B}\right) \ln \frac{\rho}{r_B}] \sigma_{s_i}^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

— для зоны сжатия.

Поскольку процесс подгибки листа является многостадийным, а учет упрочнения металла производится, как указано выше, в виде линейной зависимости, то примем следующую схему вычисления сопротивления деформации. На первом переходе деформирования вычисляем σ_{s_0} и Π .

Для степени деформации сдвига λ_1 по этим значениям находим σ_{s_1} и Π_1 и т. д. Таким образом, может быть найдена степень использования запаса пластичности при наличии подпора и растяжения металла в калибре.

Разработанная выше методика позволила создать алгоритм расчета степени использования запаса пластичности. В блоке исходных данных задается толщина полосы и ее материал. По материалу полосы опреде-

ляются параметры (σ_{s_0}, g, b) кривой упрочнения. Задается число переходов профилирования n . Калибровка валков по переходам определяет радиусы изгибов полосы и углы подгибки, т. е. геометрические параметры очага деформации, и в частности утонение стенки и радиусы нейтральной линии. Деформированное состояние полосы (12) определяется интенсивностью деформации за переход, и накопленной степенью деформации сдвига. По приведенной выше схеме рассчитывается упрочнение металла по переходам. При необходимости задается наличие тангенциального подпора σ_n в калибре в виде

$$\sigma_n = -a\sigma_{si} \quad (17)$$

где a – положительная величина, причем $0 \leq a \leq 1$.

В следующем блоке расчета определяются напряжения σ_ρ и σ_θ (12), гидростатическое давление и показатель напряженного состояния (15 и 16).

На основе аппроксимирующей функции (5) определяется при известных μ_σ и σ/T степень деформации до разрушения. Далее вычисляем степень использования запаса пластичности за переход и за несколько переходов (6). В том случае, когда $\omega_\Sigma < \omega^*$, то вычисления повторяются с новыми значениями параметров калибровки валков, а при исчерпании ресурса пластичности выдается необходимая маркировка. Если разрушения металла не наступает, то расчет вышеперечисленных параметров повторяется до тех пор, пока не будут рассчитаны все переходы профилирования.

В том случае, когда будет проводиться расчет параметров напряженно-деформированного состояния при повышенных температурах, то следует ввести дополнительные блоки, позволяющие задавать (или рассчитывать) температуру металла по переходам, находить с учетом этого параметры упрочнения металла и напряженное состояние, а степень деформации до разрушения λ_{λ^*} определять с учетом температуры.

Поскольку процесс формовки профильных труб представляет собой изгиб листа по нескольким ребрам, то в качестве примера с использованием описанного алгоритма для конкретной схемы формовки корытного профиля 105×80×4 мм [5] проведен расчет. Рассчитывались геометрические параметры очага деформации, единичная степень деформации λ_i , накопленная степень деформации λ_Σ , значения сопротивления деформации, а также степень использования запаса пластичности для трех случаев: отсутствие подпора или растяжения ω_Σ , при наличии подпора $\omega_{\Sigma\Pi}$, и растяжения $\omega_{\Sigma P}$.

Расчеты показали, что в рассмотренной калибровке валков степень деформации по клетям изменяется мало, а суммарная степень деформации нарастает практически по линейной зависимости. Накопленная степень использования запаса пластичности при отсутствии подпора или натяжения меньше, чем при наличии растяжения, и больше, чем при наличии подпора.

С ростом величины тангенциального подпора полосы степень использования запаса пластичности (рис. 3 и 4) снижается.

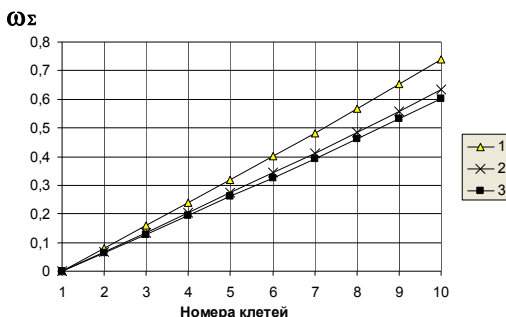


Рис. 3. Изменение степени использования запаса пластичности по клетям: 1 – при отсутствии подпора; 2 – значение подпора $0,5 \sigma_s$; 3 – при наличии подпора величиной $0,7 \sigma_s$ (материал – титановый сплав ВТ 1-0)

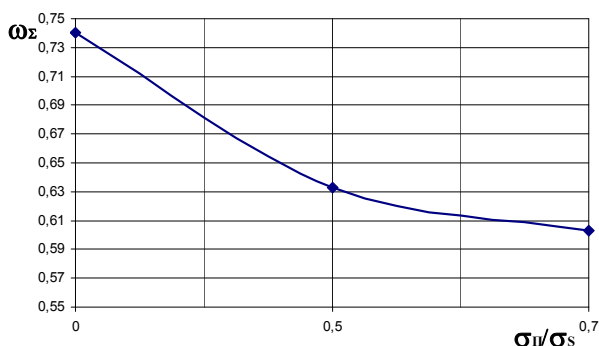


Рис. 4. Зависимость степени использования запаса пластичности от величины тангенциального подпора в калибре (сплав ВТ 1-0)

Таким образом, на основе предложенной методики и разработанного алгоритма возможен численный анализ степени использования запаса

пластичности (поврежденности) в процессах формовки из листа с наложением в очаге деформации тангенциального подпора.

-
1. *Смирнов-Аляев Г. А., Чикидовский В. П.* Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1972. 360 с.
 2. *Малинин Н. И.* Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1968. 400 с.
 3. *Богатов А. А., Мижирецкий О. И., Смирнов С. В.* Ресурс пластичности при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1984.
 4. *Богатов А. А.* Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. 283 с.
 5. *Тришевский И. С., Докторов М. Е.* Теоретические основы процесса профилирования. М.: Металлургия, 1980. 288 с.
 6. *Сторожев М. В., Попов Е. А.* Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

К ВОПРОСУ ИСПРАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ГРАНЕНОСТИ ТРУБ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОЧЕНИЯ НА САМОУСТАНОВЛИВАЮЩЕЙСЯ ОПРАВКЕ

В. А. Спиридонов, Е. А. Митюшов, А. А. Паршина
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Рассмотрена математическая модель волочения граненой трубной заготовки, представленной двумя линейчатыми поверхностями, каждая из которых построена на двух одинаково параметризованных линиях. Получены зависимости максимальной гранености заготовки от коэффициента толстостенности трубы и обжатия по стенке и диаметру, по которым можно проектировать и проверять реальные маршруты волочения, исправляющие граненость трубной заготовки.

A mathematical model of faceted pipe billet drawing presented by two ruled surfaces, each of which is constructed on two identical parameterized lines, is considered. The maximum faceted billet dependences on coefficient of thick-walled pipe and compression on the wall and diameter, by which one can design and verify actual routes drawing correcting of pipe billet faceted, are obtained.

Дефект гранености внутренней поверхности заготовки, возникающий после прокатки труб на редуционном стане, существенно снижает качество готового продукта, так как в поперечном сечении трубы создается существенная разностенность, выражающаяся во внутренней гранености поверхности [1]. Поэтому данный дефект должен либо полностью ликвидирован, или быть снижен до значений удовлетворяющих требованиям потребителя. Вид гранености может быть различен в зависимости от разных факторов (рис. 1).

Внутренний диаметр кривой линии, которой можно описать изменение толщины стенки по периметру можно представить синусоидой [2]. В таком случае радиус внутренней поверхности заготовки граненой трубы описывается следующим выражением

$$R_3(z, t) = \begin{pmatrix} 0,5(\Delta \sin(nt) + D_{BH}) \sin t \\ 0,5(\Delta \sin(nt) + D_{BH}) \cos t \end{pmatrix} \quad (1)$$

z

где $\Delta = \frac{D_{BH \max}}{D_{BH \min}}$ – абсолютная граненость трубы; n – количество граней трубы; D_{BH} – средний внутренний диаметр граненой заготовки; $D_{BH \max}$ и $D_{BH \min}$ – максимальный и минимальный диаметр заготовки.

Для снижения гранености используются различные мероприятия, связанные с самим процессом редуцирования трубы, но все эти меры лишь снижают дефект, не избавляя от него. Процессом, способным полностью избавиться внутреннюю поверхность трубы от гранености, является волочение на самоустанавливающейся оправке. При достаточной степени вытяжки (особенно по стенке) труба выглаживается. Однако необходимо знать величину вытяжки для устранения конкретной величины гранености на конкретной трубе, а также какую величину гранености можно устранить волочением за один проход. Таким образом, задача состоит в определении критерия, который бы показывал, какую величину абсолютной гранености можно устранить при волочении трубы.

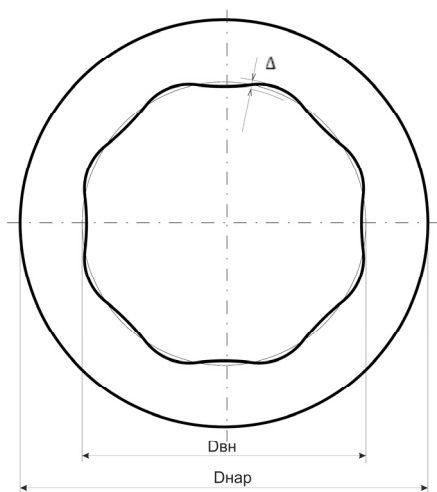


Рис. 1. Граненость внутренней поверхности трубы
(количество граней $n = 8$)

Рассмотрим геометрию очага деформации, возникающего при волочении граненой трубы. Так как труба имеет разную толщину стенки по поперечному сечению, а впадины и выпуклости находятся на ее внутренней поверхности, посадка внутренней поверхности трубы на оправку в процессе волочения будет не одинаковой. В том месте трубы, где стенка будет толще, контакт внутренней поверхности трубы произойдет раньше, а в том месте, где стенка будет более тонкая – позднее. Если посмотреть на внутреннюю часть трубы в очаге деформации (рис. 2), то

можно увидеть линию, принадлежащую конической поверхности оправки, по которой происходит контакт трубы с оправкой.

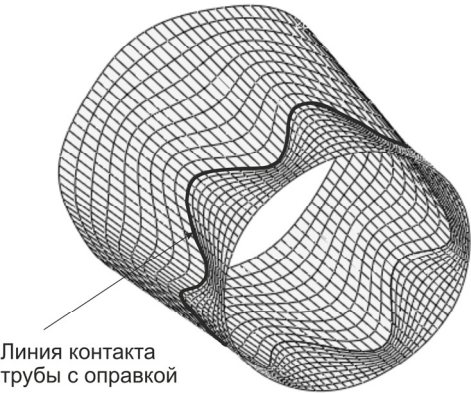


Рис. 2. Внутренняя поверхность граненой заготовки, протягиваемая на конической оправке

Наружная стенка трубы будет описываться поверхностью с образующей вращения, проходящей через точки $R_{1\text{ ЗАГ}}$, R_1 , R_2 (рис. 3).

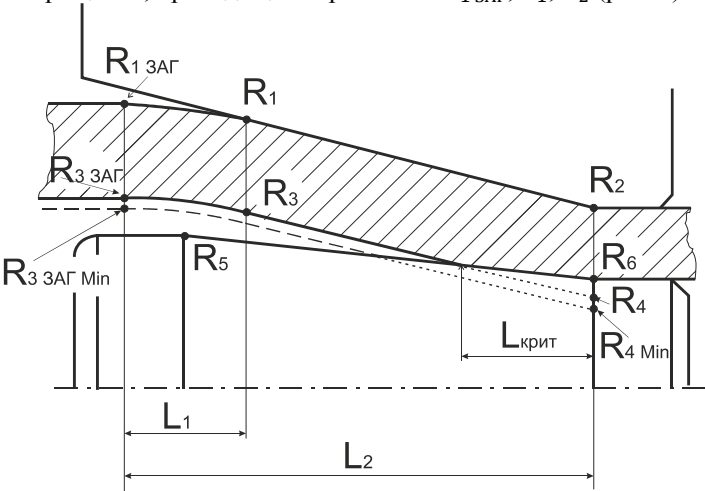


Рис. 3. Схема очага деформации граненой трубы

Внутренняя поверхность трубы будет описываться поверхностью, проходящей через точки $R_{3\text{ заг}}$, R_3 , R_6 . Таким образом, чем тоньше стенка, тем ближе к калибрующему пояску произойдет посадка трубы на оправку. Иногда (при большой гранености) посадка тонкой части может осуществиться не на конический участок оправки, а сразу на калибрующий. И совсем недопустимым будет тот случай, если тонкая часть стенки вообще не будет обжиматься на оправке.

Расстояние от точки посадки самой тонкой части стенки трубы на коническую часть оправки до конца конического участка (перехода его в калибрующий) $L_{\text{крит}}$ не должно стать нулевым в месте утонения. Если самый тонкий участок трубы будет садиться на калибрующий участок, то исправление дефектов разностенности станет невозможным.

Для исследования исправления величины гранености заготовки интересно описание очага деформации, который целесообразно ограничить зоной редуцирования трубы на волоке и зоной участка обжатия стенки на оправке. Таким образом, в данном исследовании наружная стенка трубы описывалась конической поверхностью, проходящей через точки $R_{1\text{ заг}}$, R_1 , R_2 , а внутренняя поверхность деформируемой заготовки – через точки $R_{3\text{ заг}}$, R_3 , R_6 . Величину внеконтактной зоны деформации L_1 и изменение наружного $R_{1\text{ заг}}$ и внутреннего $R_{3\text{ заг}}$ радиуса можно рассчитать по методике [3].

Известна запись векторного уравнения линейчатой поверхности, построенной на двух произвольных одинаково параметризованных направляющих линиях [4–5].

$$\vec{R}(v, u) = v\vec{r}_1(u) + (1 - v)\vec{r}_2(u), \quad (2)$$

где $0 \leq v \leq 1$; $u_1 \leq u \leq u_2$, \vec{r}_1 и \vec{r}_2 – радиус-векторы параметризованных линий.

$$\vec{r}_1(\varphi) = \begin{pmatrix} R_1 \cos \varphi \\ R_1 \sin \varphi \\ L1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{r}_2(\varphi) = \begin{pmatrix} R_2 \cos \varphi \\ R_2 \sin \varphi \\ L2 \end{pmatrix}$$

Поверхность, описывающая изменение геометрии наружной стенки трубы описывается формулой (2). Поверхность, описывающая внутреннюю часть деформируемой трубы, записывается аналогично описанию наружной стенки, но выражается через две поверхности. Первая поверхность $\vec{R}_{\text{гран}}(v, \varphi)$, описывающая участок редуцирования внутренней поверхности трубы будет записана как:

$$\vec{R}_{\text{гран}}(v, \varphi) = v\vec{r}_3(\varphi) + (1 - v)\vec{r}_4(\varphi). \quad (3)$$

Вторая поверхность $\vec{R}_{\text{конич}}(\nu, \varphi)$, описывающая участок обжатия трубы на коническом участке оправки будет записана следующим образом:

$$\vec{R}_{\text{конич}}(\nu, \varphi) = \nu \vec{r}_4(\varphi) + (1 - \nu) \vec{r}_5(\varphi), \quad (4)$$

где в уравнениях (3)–(4) $0 \leq \nu \leq 1$; $-\pi \leq u \leq \pi$; $\vec{r}_3(\varphi)$ – радиус-вектор, описывающий сечение граненой трубы на входе в участок редуцирования; $\vec{r}_4(\varphi)$ – радиус-вектор, описывающий пересечение конической поверхности граненой трубы и конической части самоустанавливающейся оправки; $\vec{r}_5(\varphi)$ – радиус-вектор, описывающий сечение круглой части трубы на выходе из участка редуцирования (диаметр данного участка равен участку калибрующей части оправки)

Соответственно, выражения для радиус-векторов, описывающих внутреннюю поверхность трубы, в очаге деформации примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \vec{r}_3(\varphi) &= \begin{pmatrix} \left(\frac{\Delta}{2} \sin n\varphi + R_3 \right) \cos \varphi \\ \left(\frac{\Delta}{2} \sin n\varphi + R_3 \right) \sin \varphi \end{pmatrix}, \\ &\quad \text{L1} \\ \vec{r}_4(\varphi) &= \begin{pmatrix} \left(\left(\frac{\Delta}{2} \sin n\varphi + R_4 \right) + \frac{(R_3 - R_4)(R_6 - R_4 - \frac{\Delta}{2} \sin n\varphi)}{R_3 + R_6 - R_4 - R_5} \right) \cos \varphi \\ \left(\left(\frac{\Delta}{2} \sin n\varphi + R_4 \right) + \frac{(R_3 - R_4)(R_6 - R_4 - \frac{\Delta}{2} \sin n\varphi)}{R_2 + R_6 - R_4 - R_5} \right) \sin \varphi \end{pmatrix}, \\ &\quad \text{L2} + \frac{(L_1 - L_2)(R_6 - R_4 - \frac{\Delta}{2} \sin n\varphi)}{R_3 + R_6 - R_4 - R_5} \\ \vec{r}_5(\varphi) &= \begin{pmatrix} R_4 + \frac{(R_5 - R_6)(R_6 - R_4 - \frac{\Delta}{2} \sin n\varphi)}{R_3 + R_6 - R_4 - R_5} \\ R_4 + \frac{(R_5 - R_6)(R_6 - R_4 - \frac{\Delta}{2} \sin n\varphi)}{R_3 + R_6 - R_4 - R_5} \end{pmatrix}, \\ &\quad \text{L2} \end{aligned}$$

где обозначения показаны на рис. 3.

Для поиска зависимостей, определяющих критическую граненость, которую можно исправить волочением на самоустанавливающейся оправке, используя соотношения 1–4, была построена объемная математическая модель очага деформации (рис. 4), на которой проводился параметрический анализ. Угол волоки и оправки был принят постоянным, соответственно, $\alpha_{\text{вол}} = 13^\circ$ и $\alpha_{\text{опр}} = 9^\circ$.

Для удобства анализа ввели показатель относительная граненость:

$$\delta = \frac{\Delta}{S_0},$$

где Δ – абсолютная граненость трубы; S_0 – толщина стенки заготовки, которую представили как $S_0 = R_{1\text{ заГ}} - R_{3\text{ заГ}}$.

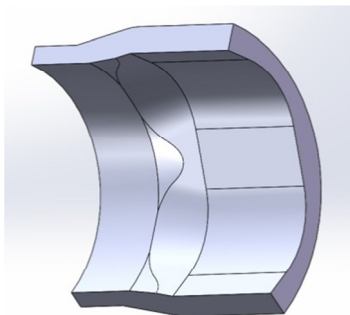


Рис. 4. Модель темплета очага деформации

Для каждого маршрута волочения существует свой предел по относительной гранености. Его можно представить как:

$$\delta_{\text{крит}} = \frac{\Delta_{\text{крит}}}{S_0}$$

где $\Delta_{\text{крит}}$ – предел абсолютной гранености трубы для конкретного маршрута волочения.

В свою очередь, величина $\delta_{\text{крит}}$ будет зависеть от следующих переменных, связанных с конкретным маршрутом волочения:

$$\delta_{\text{крит}} = f(\alpha_{\text{вол}}, \alpha_{\text{опр}}, D, S, \mu, \Delta),$$

где $\alpha_{\text{вол}}$ – угол конусности волоки; $\alpha_{\text{опр}}$ – угол конусности оправки; D – наружный диаметр заготовки; S – средняя толщина стенки трубы; μ – вытяжка; Δ – величина абсолютной гранености.

Задаваясь маршрутами волочения с различной величиной толстостенности, вытяжкой по стенке, по диаметру, с разной величиной относительной гранености, были получены критические значения, которые представлены на рис. 5–7.

При проведении анализа было выявлено, что суммарный коэффициент вытяжки не будет показательным для определения тенденции изменения критической гранености. Увеличение обжатия по диаметру ведет к снижению критической гранености, то есть чем больше обжатие по диамет-

ру, тем меньшую величину гранености можно исправить. Увеличение обжатия по стенке, наоборот, приведет значительному повышению критической гранености. Причем обжатие по стенке будет иметь гораздо большее влияние на критическую граненость, чем обжатие по диаметру.

Используя зависимости, представленные на рис. 5–7 можно проектировать и проверять реальные маршруты волочения, которые могут исправить граненость трубной заготовки.

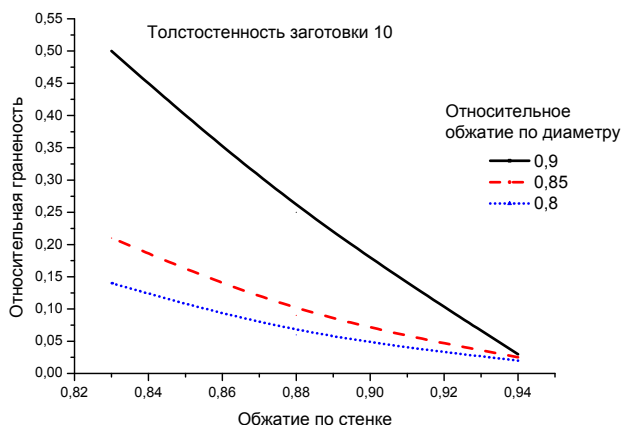


Рис. 5. Зависимость критической гранености от величины обжатия по стенке при коэффициенте толстоценности трубы 10

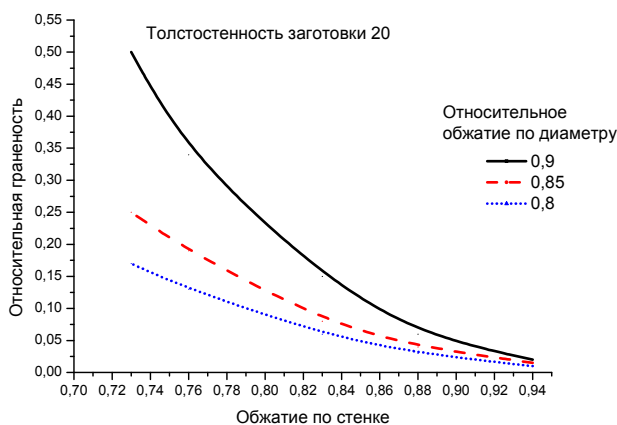


Рис. 6. Зависимость критической гранености от величины обжатия по стенке при коэффициенте толстоценности трубы 20

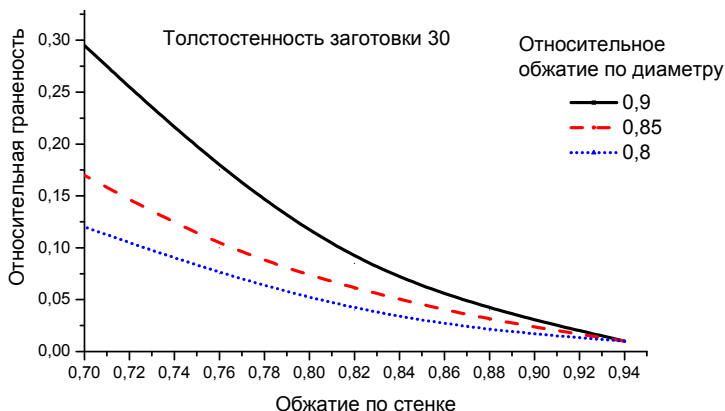


Рис. 7. Зависимость критической гранености от величины обжатия по стенке при коэффициенте толстостенности трубы 30

Выводы

- для устранения гранености путем волочения на самоустанавливающейся оправке больше всего подходят толстостенные трубы;
- чем сильнее обжатие при волочении по стенке трубы, тем большую граненость можно исправить;
- увеличение обжатия по диаметру практически не способствует устранению гранености;

1. Столетний М. Ф., Клемперт Е. Д. Точность труб. М.: Металлургия, 1975. 240 с.
2. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб / Гуляев Г. И. и др. М: Металлургия, 1975. 264 с.
3. Паршин В. С. Энергосиловые параметры процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке криволинейной формы / В. С. Паршин, Г. П. Моисеев, В. А. Спиридонов // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. 1988. № 6. С. 42–46.
4. Никулин Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 560 с.
5. Митюшов Е. А., Митюшова Л. Л. Математические основы компьютерной геометрии : учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. 60 с.

ЭНЕРГЕТИКА

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ ИССЛЕДОВАНИИ ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЫ

Н.А. Абаймов, А.Ф. Рыжков

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В данной работе рассмотрены три модели: k - ε модель стандартного вида, k - ω SST и модель переноса рейнольдсовых напряжений SSG. Верификация проведена с использованием данных, полученных на изотермической циклонной камере (ИТМО НАН Беларуси). В результате сопоставления результатов расчетов с использованием трех моделей турбулентности и экспериментальных данных, полученных на циклонной камере, можно сделать вывод о преимуществе модели k - ε .

In this paper three models: k - ε standard, k - ω SST and Reynolds stresses SSG are discussed. Verification is carried out using data obtained at isothermal cyclone chamber (ITMO NASB). As a result, we can conclude about the advantages of the model k - ε .

Современный этап развития техники характеризуется широким распространением технологий, так или иначе связанных с закрученными турбулентными потоками. В частности, в энергетике переход от слоевого к факельному, а затем и к вихревому сжиганию топлива позволил существенно интенсифицировать процессы, происходящие в топочной камере [1]. Вихревой принцип организации движения потоков также широко применяется в газогенераторной технике с целью снижения габаритов установок газификации твердого топлива [2].

Усложнение аэродинамики энергетических и промышленных установок предъявляет высокие требования к моделям турбулентности, используемым при CFD-моделировании соответствующих процессов [3]. Сегодня наибольшее распространение получили три крупных направления (от наиболее ресурсоемких к менее ресурсоемким): прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation, DNS), моделирование крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) и уравнения Навье – Стокса осредненные по Рейнольдсу (Reynolds–Averaged Navier–Stokes, RANS). RANS подход является наиболее распространенным ввиду оптимального соотношения точности и ресурсоемкости. Среди RANS моделей традиционно выделяют три крупных семейства: двухпараметрические модели k - ε и k - ω , а также более сложная модель переноса рейнольдсовых напряжений (Reynold's Stress Models, RSM). Каждое из этих

семейств включает в себя несколько популярных модификаций, нашедших свое применение при решении различных задач [4].

В данной работе рассмотрены три модели турбулентности (по одной из каждого семейства): k-ε модель стандартного вида [5], k-ω модель с модификацией переноса напряжений сдвига (Shear Stress Transport, SST) [6] и модель переноса рейнольдсовых напряжений с модификацией, разработанной Speziale C.G., Sarkar S. и Gatski T.B. (Speziale-Sarkar-Gatski, SSG) [7].

Приведем ряд основных уравнений, используемых при численном моделировании турбулентного течения несжимаемой жидкости. Уравнения Рейнольдса с учетом межфазного взаимодействия:

$$\begin{aligned}\nabla(\rho \mathbf{v}) &= S_{p,m}, \\ \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) &= -\nabla p + \nabla(\tau^m + \tau^t) + S_{p,v},\end{aligned}$$

где тензор вязких напряжений находится по формуле:

$$\tau_{ij}^m = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right),$$

где τ^t – тензор рейнольдсовых напряжений, а $S_{p,m}$, $S_{p,v}$ – скорость изменения массы и импульса за счет межфазного взаимодействия.

Для замыкания уравнений Рейнольдса использовались модели k-ε стандартного вида и k-ω модификации SST.

Напряжения Рейнольдса определяются через тензор скоростей деформации и турбулентную вязкость:

$$\tau_{ij}^t = \mu_t \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \right].$$

В модели переноса рейнольдсовых напряжений компоненты $\overline{u'_i u'_j}$ тензора напряжений Рейнольдса находятся в результате решения уравнений переноса

$$\frac{\partial}{\partial x_l}(\rho u_l \overline{u'_i u'_j}) = \rho(P_{ij} + Diff_{ij} - \varepsilon_{ij} + \phi_{ij}),$$

где P_{ij} – член описывающий генерацию рейнольдсовых напряжений, $Diff_{ij}$ – перенос за счет диффузии, ε_{ij} – скорость диссипации, ϕ_{ij} – перекрестный член давления.

Тензор генерации находится следующим образом:

$$P_{ij} = -\left(\overline{u'_i u'_l} \frac{\partial u_j}{\partial x_l} + \overline{u'_j u'_l} \frac{\partial u_i}{\partial x_l}\right).$$

В данном случае диффузионный член определяется с помощью обобщенной градиентной гипотезы:

$$Diff_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} + C_s \rho \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_k u'_l} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_l} \right).$$

Вдали от стенки тензор скорости диссипации считается изотропным:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon.$$

где ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентных пульсаций.

Она находится из уравнения переноса, соответствующего аналогичному уравнению в модели турбулентности k - ε :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_\varepsilon \rho \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_i u'_j} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \rho \frac{\varepsilon}{K} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon)$$

где $C_\varepsilon = 0,183$ $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ $C_{\varepsilon 2} = 1,83$.

Кинетическая энергия турбулентности k и скорость ее генерации P_k находятся как сумма диагональных компонент соответствующих тензоров:

$$P_k = \frac{1}{2} P_{ii}, k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}.$$

Перекрестный член давления находится следующим образом:

$$\phi_{ij} = \frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) = C_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \right) - \frac{C_2}{\rho} \left[A_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} A_{ll} \right],$$

где

$$A_{ij} = P_{ij} - \left(\frac{\partial}{\partial x_l} (\rho u_l \overline{u'_i u'_j}) \right), C_1 = 1,8, C_2 = 0,6.$$

Верификация проведена с использованием данных, полученных на изотермической циклонной (циклонно-слоевой) камере (ИТМО НАН Беларуси) [8, 9]. Вертикальная циклонная камера установки имела внутренний диаметр 0,393 м и высоту 0,408 м (рис. 1). Диаметр выходного отверстия принимался 0,5 м. Сопла тангенциального ввода воздуха шириной 0,0152 м имели основную конфигурацию конфигурации с высотой канала ввода воздуха 0,4 м.

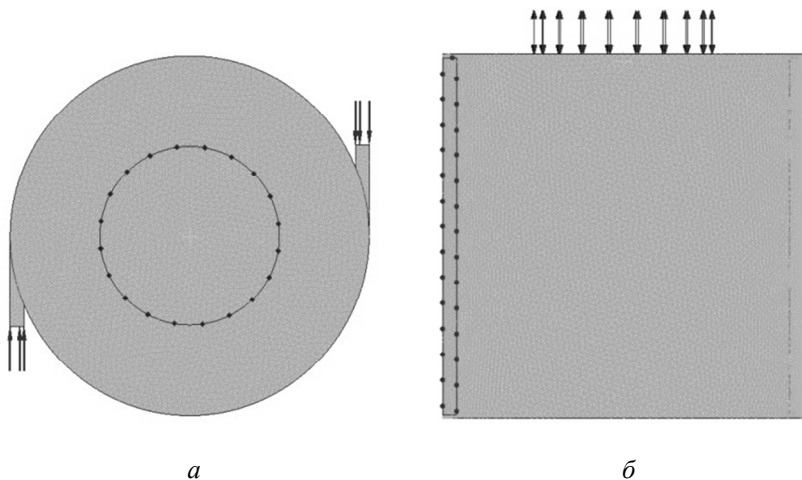


Рис. 1. Циклонная камера (ИТМО НАН Беларуси)

Для верификации использовались экспериментальные данные, полученные при скорости потока на входе 7,9 м/с в верхнем сечении камеры (на высоте 0,3672 м от нижнего торца). Расчетная сетка содержала более 1,2 млн элементов, а увеличение их количества несущественно влияло на результаты расчета. Интенсивность турбулентности на входе принималась равной 5 %. На выходе из камеры задавались условия открытого пространства. На стенке камеры – условия прилипания. Каждый расчет длился более 10 тыс. итераций. Максимальная невязка составляла 10^{-3} . При этом наибольший небаланс не превышал 1 %.

На рис. 2 представлено сравнение распределений безразмерной тангенциальной составляющей скорости потока (V_t) по безразмерному радиусу (r), полученных во время эксперимента и в результате численного моделирования. В приосевой области и у стенки наилучшую схожесть с экспериментальными данными демонстрирует модель k- ϵ . Пиковые значения моделей k- ω SST и RSM SSG близки к экспериментальным.

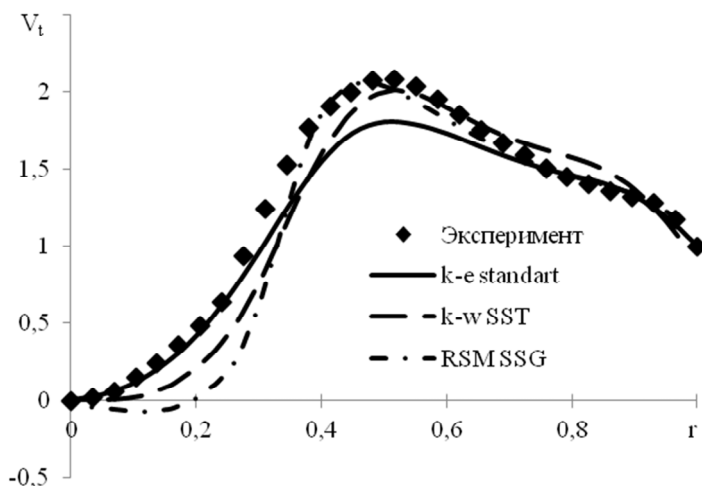


Рис. 2. Безразмерная тангенциальная составляющая скорости

В приосевой области камеры результаты, полученные с использованием модели k- ϵ , лучше других двух случаев соответствуют экспериментальным измерениям продольной составляющей скорости (V_a) (рис. 3).

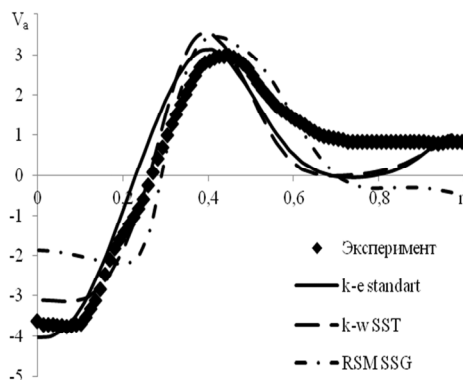


Рис. 3. Безразмерная продольная составляющая скорости

Все три модели завышают значение полного давления (P) в приосевой и пристеночной областях камеры. Тем не менее модель $k-\epsilon$ показывает наиболее близкие к эксперименту результаты (рис. 4).

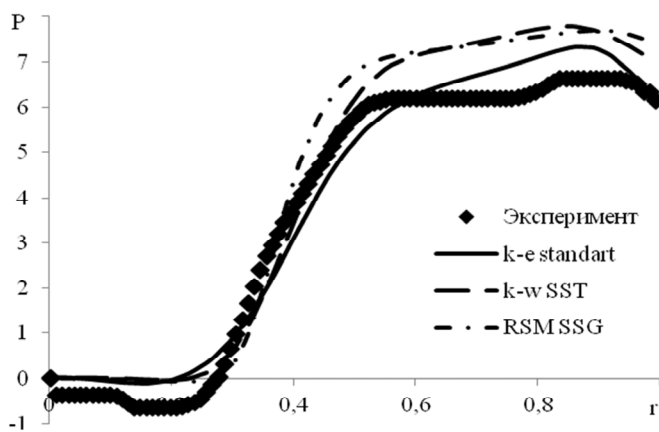


Рис. 4. Безразмерной полное давление

В результате сопоставления результатов расчетов с использованием трех моделей турбулентности и экспериментальных данных, полученных на циклонно-слоевой камере, можно сделать вывод о преимуществе модели турбулентности $k-\epsilon$ стандартного вида над моделями $k-\omega$ SST и RSM SSG.

-
1. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох, и др. М.-Л.: Энергия, 1966.
 2. Разработка растопочной пылеугольной горелки / Б.В. Берг, А. Батхишиг, Н.В. Вальцев и др. // Электрические станции. 2012. № 10. С. 22–27.
 3. Multiphysics simulations of entrained flow gasification. Part I: Validating the nonreacting flow solver and the particle turbulent dispersion model / M. Kumar, A.F. Ghoniem // Energy and Fuels. № 26. P. 451–463.
 4. Multiphysics simulations of entrained flow gasification. Part II: Constructing and validating the overall model / M. Kumar, A.F. Ghoniem // Energy and Fuels. № 26. P. 464–479.
 5. Launder B. E., Sharma B. I. Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc // Letters in Heat and Mass Transfer. 1974. № 1–2. P. 131–138.
 6. Smirnov P., Menter F. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term // Proc. of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, GT 2008. Germany, Berlin. June 9–13. 2008. P. 10.
 7. Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B. Modeling the Pressure-Strain Correlation of Turbulence: an Invariant Dynamical Systems Approach // J. of Fluid Mechanics. 1991. № 227. P. 245–272.
 8. Численное исследование и оптимизация циклонного газификатора бурых углей / Н.А. Абаимов, А.Ф. Рыжков, Ю.С. Теплицкий и др. // Научное обозрение. 2014. № 8–2. С. 630–637.
 9. Исследование структуры закрученных течений в циклонной камере при различных условиях ввода и вывода газа / Е.А. Пицуха, Ю.С. Теплицкий, В.А. Бородуля и др. // ИФЖ. 2012. Т. 85. № 2. С. 305–317.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С МНОГОИНВЕРТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Б.Ю. Васильев

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург

Рассмотрены преобразователи частоты многодвигательных асинхронных электромеханических систем. Показаны существующие преобразователи частоты и системы управления многодвигательными электроприводами. Выявлены их недостатки. Предложены структура силовой части преобразователя частоты с активным выпрямителем, обеспечивающего коррекцию коэффициента мощности электропривода, и система автоматического управления электродвигателями, обеспечивающая повышенный уровень энергосбережения. Исследована и проанализирована эффективность предложенных технических решений.

The frequency converters for multimotor electromechanical systems with electrical drive considered. Existing of the frequency converters and control system of multimotor electrical drive shown. Demerits of the frequency converters detectable. The power structure of the frequency converter with active rectifier, providing correction power factor, and the control system electrical drive, providing increased level of energy savings, proposed. Efficiency the proposed solutions research and analyze.

Введение

Современный электропривод промышленных предприятий, как правило, представляет собой многодвигательную электромеханическую систему (МЭС), которая может быть частично или полностью регулируемой. Основой таких систем, в большинстве случаев, являются асинхронные двигатели и силовой полупроводниковый преобразователь частоты [1–4].

Широкое распространение асинхронные двигатели получили благодаря простой конструкции, высокой надежности, низкой стоимости и возможности с помощью простых технических средств обеспечить регулирование частоты вращения и момента в переходных и установившихся режимах. Основным энергетический недостаток асинхронных двигателей заключается в низком коэффициенте мощности.

Для регулирования частоты вращения группы асинхронных двигателей в большинстве случаев используют общий двухзвенный преобразо-

ватель частоты (ПЧ), в состав которого входят диодный неуправляемый выпрямитель и транзисторный полностью управляемый автономный инвертор. Структурная схема МЭС с асинхронными двигателями и общим преобразователем частоты, получившая широкое распространение на промышленных предприятиях, представлена на рис. 1.

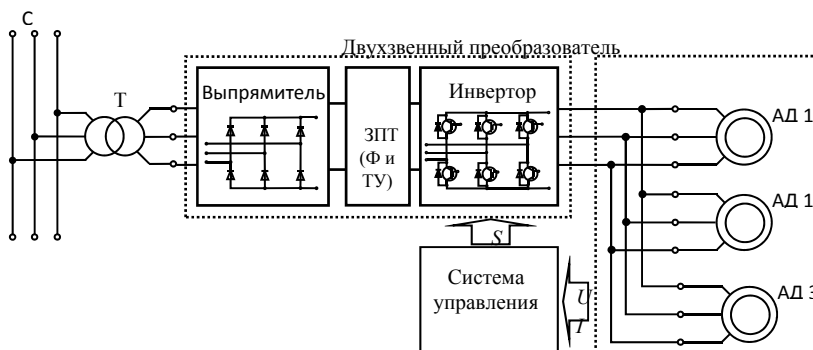


Рис. 1. Структурная схема многодвигательной электромеханической системы с общим преобразователем частоты

Такие ПЧ обладают рядом энергетических недостатков. Значительный негативный эффект вносит диодный выпрямитель, который характеризуется низким уровнем электромагнитной совместимости с сетью электроснабжения, что выражается в следующем:

- высоком значении искажения напряжения сети электроснабжения и потребляемого тока;
- низком коэффициенте мощности электропривода;
- односторонней проводимости выпрямителя;
- низком коэффициенте использования трансформатора;
- значительными пульсациями напряжения в звене постоянного тока.

Другой негативный эффект от использования такого преобразователя частоты в МЭС – технологический, обусловлен общей системой управления, которая способна обеспечить только синхронное (одновременное и одинаковое) управление всеми механическими координатами приводных двигателей.

Эти энергетические и технологические недостатки делают актуальной задачу разработки преобразователя частоты, способного обеспечить высокий уровень электромагнитной совместимости, единичный коэф-

фициент мощности многодвигательного асинхронного электропривода и раздельное энергоэффективное управление приводными двигателями [4–6].

Способы повышения энергетической и технологической эффективности многодвигательной электромеханической системы

Энергетические проблемы МЭС, т. е. обеспечение коэффициента мощности МЭС с асинхронными двигателями на уровне единицы и синусоидальность напряжения сети и потребляемого тока, можно решить путем использования в ПЧ активного выпрямителя. Силовая схема активного выпрямителя ПЧ, как правило, унифицируется со схемой автономного инвертора и выполняется по схеме, идентичной схеме инвертора и по существу представляет собой обращенный инвертор. При использовании активного выпрямителя в преобразователе частоты, вместо трансформатора целесообразно использовать сетевые дроссели.

Системы управления активного выпрямителя и автономного инвертора, выполненные на основе алгоритма широтно-импульсной модуляции (ШИМ), также унифицированы. Благодаря использованию режима ШИМ, напряжение, формируемое активным выпрямителем на стороне переменного тока, имеет благоприятный гармонический состав, в котором основная (полезная) гармоника и высшие гармоники существенно различаются по частоте. Это повышает эффективность фильтрации высших гармоник тока, потребляемого из сети электроснабжения, сетевыми дросселями. Таким образом, решается задача потребления из сети практически синусоидального тока.

Фазовый угол потребляемого тока зависит от соотношения амплитуд и фазовых углов напряжений, приложенных к сетевым дросселям со стороны сети электроснабжения, а также от их параметров (индуктивности и активного сопротивления). Варьируя с помощью системы управления активного выпрямителя параметрами основной гармоники переменного напряжения, можно обеспечить потребление из сети необходимого тока с заданным фазовым углом. Иными словами, можно обеспечить работу ПЧ с заданным значением коэффициента мощности, например равным единице, а также с «опережающим» или «отстающим» коэффициентом мощности.

Как преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока, автономный инвертор обладает чрезвычайно ценным свойством – возможностью двустороннего энергетического обмена между сетями постоянного и переменного тока. Это свойство сохраняется и в обращенной схеме включения автономного инвертора в качестве активного выпрямителя. В итоге двухзвенный ПЧ с активным выпрямителем обеспечивает двусторонний энергетический обмен между питающей

сеть и электрическим двигателем, в том числе режимы рекуперации энергии в питающую сеть.

Технологические проблемы МЭС, т. е. обеспечение индивидуально-го управления каждым асинхронным двигателем электропривода, можно решить за счет использования многоинверторного преобразователя частоты. Каждый автономный инвертор такого преобразователя частоты, который формирует на обмотках статора приводных электродвигателей напряжения заданной амплитуды и частоты, имеет автономную систему управления, что позволяет регулировать электромеханические координаты каждого двигателя МЭС индивидуального.

Все инверторы такого преобразователя частоты подключены к общему активному выпрямителю, который обеспечивает поддержание стабильного напряжения в звене постоянного тока и уровень электромагнитной совместимости с сетью электроснабжения на заданном уровне.

Использование многоинверторного преобразователя частоты с активным выпрямителем в МЭС технологической установки подачи жидкости

На многих промышленных объектах используемые установки являются либо нерегулируемыми, т. е. приводные двигатели насосов подключаются напрямую к сети электроснабжения и регулирование их частоты вращения не осуществляется, либо используется общий двухзвенный преобразователь частоты для реализации общего управления всеми приводными электродвигателями насосов подачи воды.

Структурная схема МЭС технологической установки подачи жидкости приведена на рис. 1 и обладает описанными выше недостатками. На рис. 2 приведена структурная схема МЭС технологической подачи жидкости с многоинверторным преобразователем частоты с активным выпрямителем и индивидуальным управлением приводными асинхронными двигателями насосов.

На рис. 2 приняты следующие условные обозначения: Т – трансформатор; АД – асинхронный двигатель; Н – насос; Ф – фильтр; ТСАУ – технологическая система автоматического управления; САУ Р – система автоматического управления расхода; ССАУ – скалярная система автоматического управления; ДР – датчик расхода; СУЭП – система автоматического регулирования электроприводом; $Q_{1\text{зад}}$ ($Q_{2\text{зад}}$, $Q_{3\text{зад}}$) – заданное значение расхода первого насоса (второго, третьего); $Q_{1\text{д}}$ ($Q_{2\text{д}}$, $Q_{3\text{д}}$) – действующее значение расхода первого насоса (второго, третьего); $Q_{\text{зад}}$, $Q_{\text{д}}$ – заданное и действующее значение расхода на потребителе; $\omega_{1\text{зад}}$ ($\omega_{2\text{зад}}$, $\omega_{3\text{зад}}$) – заданное частота вращения первого двигателя (второго, третьего); $\omega_{1\text{д}}$ ($\omega_{2\text{д}}$, $\omega_{3\text{д}}$) – действующая частота вращения пер-

вого двигателя (второго, третьего); S_1 (S_2 , S_3) – коммутационная функция первого автономного инвертора (второго, третьего); U_1 – напряжение обмоток статора асинхронного двигателя.

Управление каждым электродвигателем осуществляется индивидуально. Входным управляющим воздействием для технологической системы автоматического управления электромеханической системы является задание на расход – $Q_{\text{зад}}$, расход воды, который необходим поддерживать на входе потребителя для обеспечения необходимых технологических процессов. Технологическая САУ, в соответствии с заданием на расход, должна сформировать задание на частоту вращения каждого двигателя ($\omega_{1\text{зад}}$ – заданная частота вращения первого электродвигателя; $\omega_{2\text{зад}}$ – заданная частота вращения второго электродвигателя; $\omega_{3\text{зад}}$ – заданная частота вращения третьего электродвигателя).

Расход воды на входе потребителя изменяется в пределах от 0 м³/ч до 390 м³/ч. Частота вращения каждого двигателя изменяется от 0 об/мин до 2900 об/мин.

Задание на частоту вращения каждого двигателя формируется по следующему алгоритму (правилам управления или условиям):

1) Если $0 < Q_{\text{зад}} \leq 130$, то первый электродвигатель АД1 будет работать с частотой вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{\text{зад}}$, причем $0 < \omega_{1\text{зад}} < 1,3 \omega_{\text{ном}}$; второй электродвигатель АД2 будет остановлен, т. е. $\omega_{2\text{зад}} = 0$; третий электродвигатель АД3 будет остановлен, т. е. $\omega_{3\text{зад}} = 0$.

2) Если $130 < Q_{\text{зад}} \leq 230$, то первый электродвигатель АД1 будет работать с номинальной частотой вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{\text{ном}}$, при которой первый насос обеспечивает номинальный расход $Q_{\text{ном}} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$; второй электродвигатель АД2 будет работать с частотой вращения $\omega_{2\text{зад}} = \omega_{\text{зад}} - \omega_{\text{ном}}$, причем $0 < \omega_{2\text{зад}} < 1,3 \omega_{\text{ном}}$; третий электродвигатель АД3 будет остановлен, т. е. $\omega_{3\text{зад}} = 0$.

3) Если $230 < Q_{\text{зад}} \leq 330$, то первый электродвигатель АД1 будет работать с номинальной частотой вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{\text{ном}}$ (при которой первый насос обеспечивает номинальный расход $Q_{\text{ном}} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$); второй электродвигатель АД2 будет работать с номинальной частотой вращения $\omega_{2\text{зад}} = \omega_{\text{ном}}$ (при которой второй насос обеспечивает номинальный расход $Q_{\text{ном}} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$); третий электродвигатель АД3 будет работать с частотой вращения $\omega_{3\text{зад}} = \omega_{\text{зад}} - 2\omega_{\text{ном}}$, причем $0 < \omega_{3\text{зад}} < 1,3 \omega_{\text{ном}}$.

4) Если $330 < Q_{\text{зад}} \leq 390$, то первый электродвигатель АД1 будет работать с частотой вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{\text{зад}}/3$, причем $\omega_{\text{ном}} < \omega_{1\text{зад}} < 1,3 \omega_{\text{ном}}$; второй электродвигатель АД2 будет работать с частотой вращения $\omega_{2\text{зад}} = \omega_{\text{зад}}/3$ при чем $\omega_{\text{ном}} < \omega_{2\text{зад}} < 1,3 \omega_{\text{ном}}$; третий электродвигатель АД3 будет работать с частотой вращения $\omega_{3\text{зад}} = \omega_{\text{зад}}/3$ при чем $\omega_{\text{ном}} < \omega_{3\text{зад}} < 1,3 \omega_{\text{ном}}$.

При таком управлении приводными асинхронными двигателями будет обеспечиваться, во-первых, индивидуальная работа электродвигателями с поддержанием необходимого потребителю расхода воды; во-вторых, выбор необходимого количества работающих двигателей в соответствии с уставкой по расходу; в-третьих, будет исключена работа электродвигателей с недогрузкой; в-четвертых, приводные асинхронные двигатели будут работать в номинальном режиме при увеличении задания на расход воды выше, чем может обеспечить каждый из них.

СУЭП каждым двигателем МЭС обеспечивает оптимальный скалярный закон управления асинхронным двигателем, а напряжение на обмотках статора формируется по алгоритму широтно-импульсной модуляции.

Результатом работы технологической САУ и СУЭП, за счет выбора необходимого количества работающих приводных двигателей насосов и обеспечения их оптимального режима работы, будет поддерживаться минимальное энергопотребление на уровне, соответствующем расходу воды на входе потребителя.

Исследование и анализ эффективности предложенных технических решений

Исследование эффективности предложенных технических решений в силовой части преобразователя частоты и управления режимами работы асинхронных двигателей МЭС производилось путем имитационного моделирования данной системы в среде MatLab.

Осциллограммы фазного напряжения и тока, потребляемого электроприводом, приведены на рис. 3а. Осциллограммы активной и реактивной мощности, потребляемой электроприводом в процессе разгона двигателей и в установившихся режимах, показаны на рис. 3б.

Как видно из представленных осциллограмм, использование активного выпрямителя обеспечивает работу МЭС без негативного влияния на форму напряжения сети электроснабжения и потребление МЭС с асинхронными двигателями синусоидальных токов. Также видно, что использование активного выпрямителя в многоинверторном ПЧ обеспечивает потребление практически чисто активной мощности. Эти два фактора обеспечивают работу электропривода с коэффициентом мощности около единицы.

На рис. 4а приведены осциллограммы заданного и действующего расхода воды на входе потребителя; на рис. 4б заданные и действующие частоты вращения приводных асинхронных двигателей.

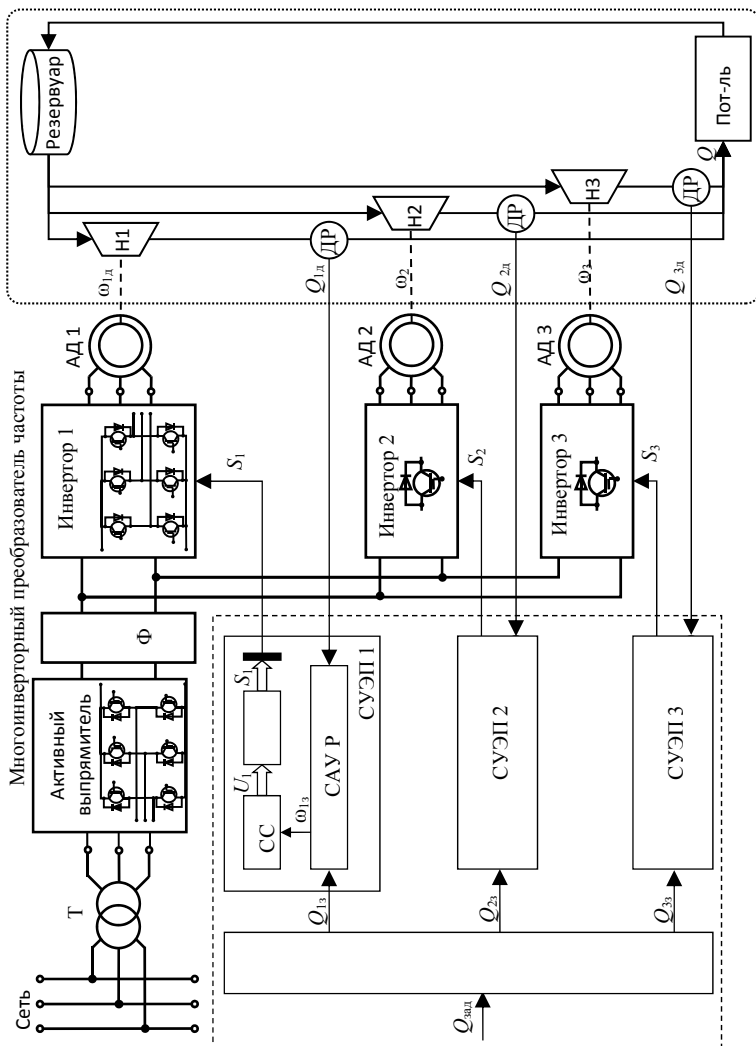


Рис. 2. Функциональная схема МЭС с многоинверторным преобразователем частоты

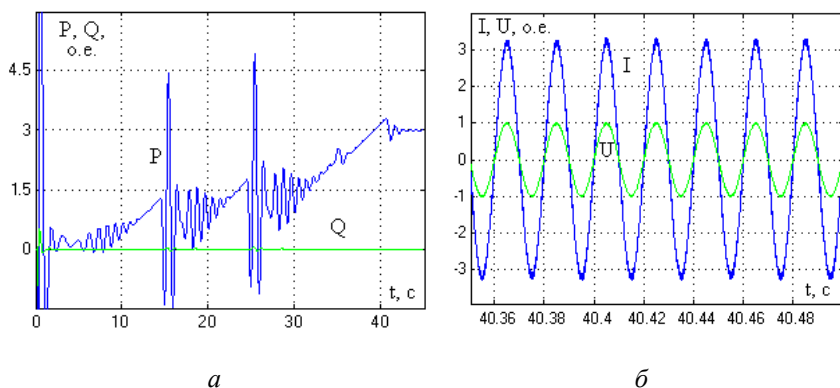


Рис. 3. Осциллограммы активной и реактивной мощности, тока и напряжения

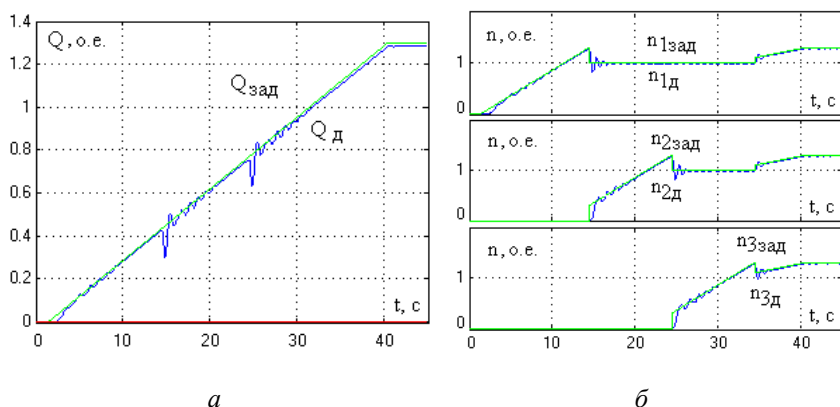


Рис. 4. Осциллограммы расхода и частот вращения

Из осциллограмм видно, что регулирование расхода осуществляется с высокой точностью, статическая ошибка практически равна нулю. Переходные процессы расхода протекают монотонно, без перерегулирования. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей, также осуществляется с высокой точностью как в динамических, так и в установившихся режимах.

Заключение

Исследования на имитационных моделях многоинверторного преобразователя частоты с активным выпрямителем для активной коррекции

коэффициента мощности и индивидуальным управлением приводными асинхронными двигателями МЭС показывает эффективность принятых технических решений для обеспечения высоких энергетических и технических характеристик электропривода технологической установки подачи воды на теплоэлектростанциях.

Технические решения в силовой части преобразователя частоты обеспечивают поддержание коэффициента мощности асинхронного многодвигательного электропривода, а разработанная система управления – выбор необходимого числа работающих электродвигателей, для поддержания заданного расхода на потребителе, и оптимального управления режимами их работы.

1. Пронин М. В. Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / под ред. Е.А. Крутякова. СПб.: Электросила, 2003. 172 с.

2. Васильев Б. Ю. Электропривод. Энергетика электропривода : учебник. М.: СОЛОН-Пресс, 2015. 268 с.

3. Шрейнер Р.Т., Калыгин А.И., Кривовяз В.К. Электроприводы переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты с ШИМ : монография. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «РГППУ». 2012. 223 с.

4. Васильев Б.Ю. Автоматизированный электропривод объектов минерально-сырьевого комплекса (применение, моделирование, исследование). СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2014. 139 с.

5. Васильев Б.Ю. Энергетическая эффективность и электромагнитная совместимость преобразователей частоты электроприводов насосных агрегатов // Нефтяное хозяйство. 2014. № 9. С. 118–121.

6. Васильев Б.Ю. Повышение эффективности работы силовых полупроводниковых преобразователей на основе векторных алгоритмов управления // Электричество. 2014. № 9. С. 44–51.

КОНСТРУКТОР ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. БЛОЧНАЯ КОМПЛЕКТНАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ПОДСТАНЦИЯ

О.С. Возисова, Д.А. Фирсова, А.О. Егоров
Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Проект «конструктор электроэнергетических систем», связанный с внедрением и освоением студентами конструирования и высокотехнологичного производства силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем, решает в первую очередь образовательные задачи связанные с обеспечением качества подготовки студентов-выпускников для нужд электроэнергетической отрасли. Новая модель конструктора корпуса блочной комплектной трансформаторной подстанции (БКТП) производства ООО «Модуль».

The main idea of “Electric power system kit” project deals with application and mastering of construction and high-tech production technology of power and secondary equipment. The project solves problems connected with providing high-quality education for electro technical students. The new model is the copy of the modular integrated transformer substation carcass produced by LLC “Module”.

Цели и задачи

С сентября 2013 г. кафедра АЭС УралЭНИН УрФУ (г. Екатеринбург) реализует долгосрочный проект «Конструктор электроэнергетических систем», связанный с внедрением и освоением студентами конструирования и высокотехнологичного производства силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем [1–2].

Конструктор выполняется на основе методов и технологий масштабного моделирования с применением новейших промышленных систем объемного проектирования. В настоящее время в производстве конструктора широко используются методы и технологии объемной печати, реализованные в 3D-принтерах, которые в основном применяются в медицине и ювелирном производстве. Такой подход к производственному процессу позволяет производить уменьшенные копии (масштабные модели) силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем и обеспечить их высокую внешнюю точность и идентичность (копийность). Очевидным преимуществом масштабного модели-

рования является обеспечение наглядности изучаемого или управляемого объекта.

На сегодняшний день с помощью проекта конструктор электроэнергетических систем решаются проблемы, существующие в системе образования, а именно обеспечение подготовки студентов-выпускников и специалистов для нужд электроэнергетической отрасли. Это связано с тем, что современная система образования поставлена в новые условия функционирования, вынуждающие образовательные учреждения сокращать и снижать финансовые, временные и другие издержки на образовательную деятельность.

Повысить эффективность обучения специалистов могут экскурсии на энергообъекты, но по причине удаленности объектов электроэнергетики, ограниченного доступа, численности рабочей группы и других факторов, доступ на объекты имеет небольшое количество учащихся. В итоге основное обучение студентов и персонала энергокомпаний осуществляется на основе мультимедийных технологий с применением фото- и видеофайлов. Обучение проектированию, монтажу и инженеринговым работам осуществляется в формате плоских (2D) чертежей на бумажном или электронном носителе, выполненных в различных программных комплексах.

При таком подходе к обучению фактически отсутствуют возможности донести до учащихся проблемы и знания о внешнем виде оборудования, его детализации и наглядности его устройства, принципах действия, назначения, конструктивного выполнения, оперативного управления, проблемах монтажа, правилах сборки и технической эксплуатации. Все эти факторы в конечном счете приводят к несоответствию выпускника вуза требованиям компаний-работодателей. Все эти и некоторые другие проблемы находят свое решение в рамках проекта «Конструктор электроэнергетических систем». Конструктор насчитывает несколько десятков масштабных моделей силового и вторичного оборудования. Сегодня мы готовы представить вам еще одну модель конструктора.

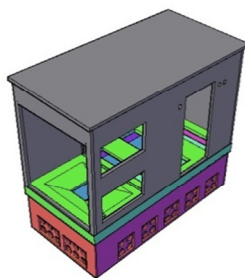
Новая модель конструктора корпуса блочной комплектной трансформаторной подстанции (БКТП) производства ООО «Модуль» (рис. 1) была выполнена в декабре 2014 года (рис. 2 и 3). Данная масштабная модель отличается от предыдущих элементов конструктора, выполненные в рамках проекта конструктор электроэнергетических систем и в конструктор БКТП были заложены новые ноу-хау, обеспечивающие высокое качество и копийность деталей, при сборке которых исключены ошибки.



Рис. 1. Внешний вид БКТП производства ООО «Модуль»



а



б

Рис. 2. *а* – Блочная комплектная трансформаторная подстанция (БКТП) ООО «Модуль»; *б* – 3D CAD модель корпуса БКТП

Блочные комплектные трансформаторные подстанции (БКТП) – современное решение для городских электрических сетей. Последние 10–15 лет данный вид трансформаторных подстанций в России приобретает большую и большую популярность. Крупные электроснабжающие организации на данный момент применяют в своих сетях именно БКТП как при новом строительстве так и при реконструкции существующих трансформаторных подстанций (рис. 2*а*).

Конструкция блока БКТП представляет собой объемный железобетонный корпус из бетона, состоящий из плиты основания и монолитного объемного блока, обеспечивающий защиту электрооборудования от внешних воздействий и необходимые прочностные характеристики при эксплуатации и транспортировке.

В плите основания каждого блока БКТП предусмотрены проемы под КРУ ВН и РУ НН для прохода кабелей и люк для доступа в кабельный приямок.

В комплекте с БКТП идет фундаментный блок (кабельный приямок), чем принципиально и отличается такая подстанция от других видов КТП.

Крыша БКТП находится под углом к поверхности земли, что обеспечивает гидроизоляцию, исключающую проникновение осадков внутрь подстанции.

В плите основания под силовыми трансформаторами предусмотрены отверстия для стока масла трансформаторов. В объемном приямке под силовым трансформатором устанавливается бак на полный объем масла трансформатора. В отсеке трансформатора предусмотрены направляющие, обеспечивающие закатку и стопорение всех типов трансформаторов, используемых в БКТП.

Создание масштабной модели БКТП

Создание модели блочной комплектной трансформаторной подстанции реализовано в 3D Лаборатории моделирования электроэнергетических систем при кафедре АЭС УралЭНИН УрФУ, студентами 4 курса С.Д. Корляковой и М.К. Мурашкиным. Управление проектом – А.О. Егоров, Е.Ю. Кокшарова. На создание конструктора в САD-программном комплексе было потрачено 3 месяца рабочего времени. Базовый конструктор данной модели БКТП выполнен в масштабе 1/35 и состоит из 21 детали (рис. 3, 4). На данном этапе создания конструктора выполнен блок-корпус конструкции, который состоит из трех основных частей: фундаментный блок-основание, трансформаторный отсек и отсек под распределительное устройство. В настоящее время ведутся работы по выполнению вентиляционных решеток, дверей, ворот и внутреннего наполнения блочной подстанции.

Готовая масштабная модель корпуса блочной комплектной трансформаторной подстанции имеет размеры 124,4×140,57×70,28мм. Внешний вид готовой 3D САD сборной модели корпуса блочной комплектной трансформаторной подстанции представлены на рисунке 3.

Технология производства

В ходе научно-технических разработок определено несколько производственных и технологических этапов, позволяющих организовать серийное производство масштабных моделей оборудования. Среди технологических и производственных этапов можно выделить основные:

- 1) проектирование в программном комплексе;
- 2) формирование матрицы спроектированного оборудования (позитив);
- 3) изготовление пресс-форм для серийного производства (негатив);
- 4) серийное производство позитива на основе негатива;
- 5) сборка, грунтовка, окраска, тонировка.

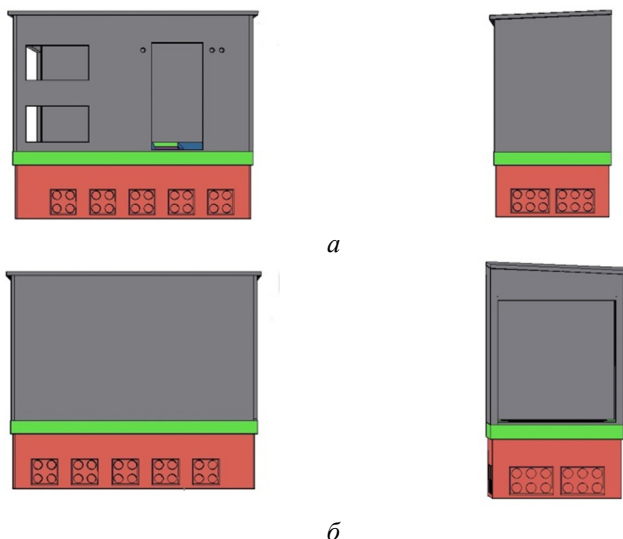


Рис. 3. *а* – внешние стенки 3D CAD модели корпуса блочной комплектной подстанции; *б* – внешние стенки 3D CAD модели корпуса блочной комплектной подстанции

Для проектирования на ранних стадиях используются компьютеры с программными комплексами, которые позволяют выполнять объемные чертежи AutoCAD, Cubex-3D Systems, CreationWorkShop и др. Для выпуска прототипа используются различные технологии 3D-печати. В частности, для производства настоящего конструктора БКТП использованы технологии объемной печати акриловыми полимерами (рис. 5). После печати конструктора БКТП осуществляется его сборка, грунтовка, окраска и пуск в эксплуатацию.

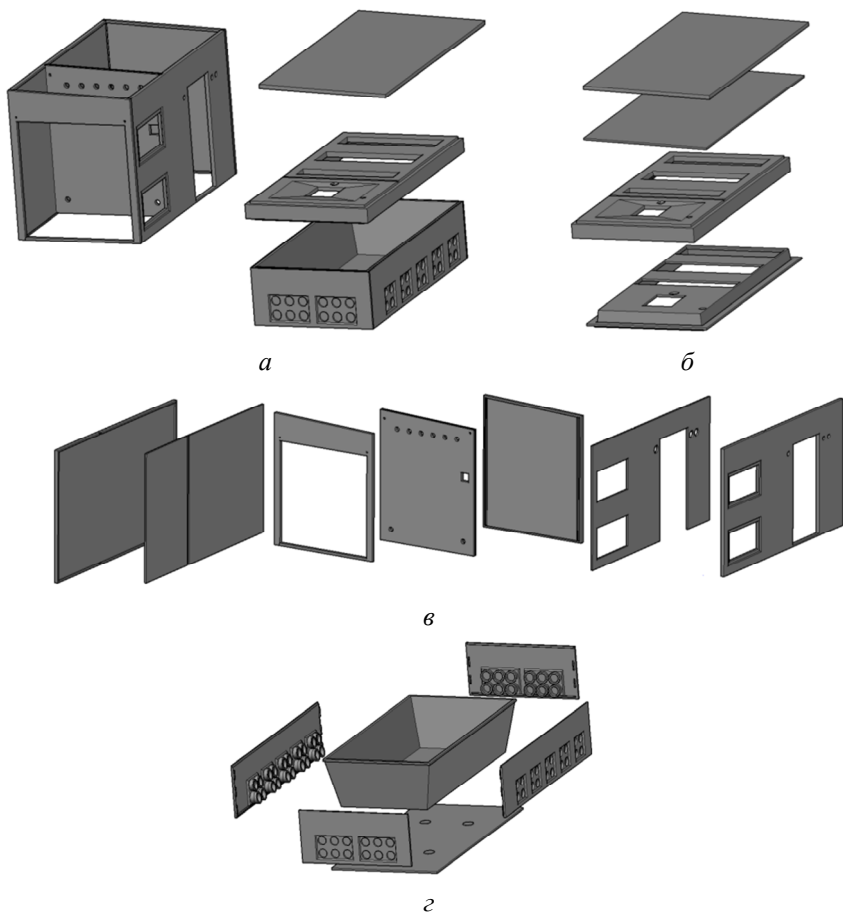
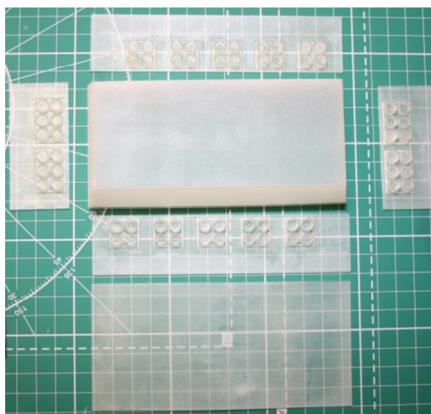
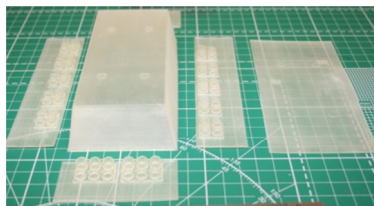


Рис. 4. 3D-чертеж конструктора блочно-модульной комплектной трансформаторной подстанции БТПП-10/0.4 кВ производства ООО «Модуль»:

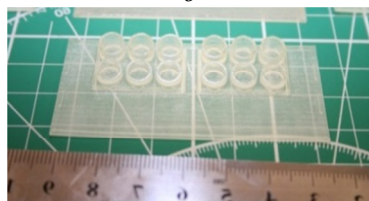
а – общая компоновка; *б* – разобранные половая и потолочные плиты;
в – разобранная на стеновые плиты коробка БТПП;
г – фундамент-маслояма БТПП



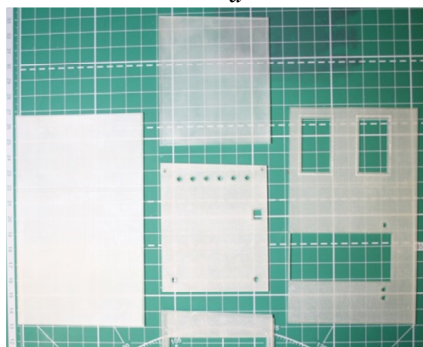
а



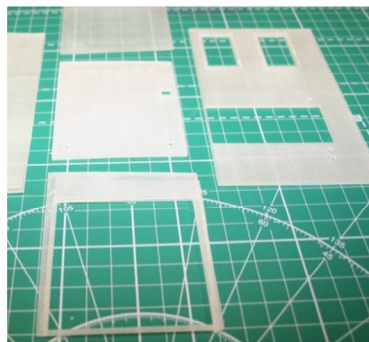
б



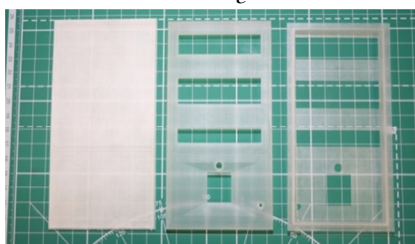
в



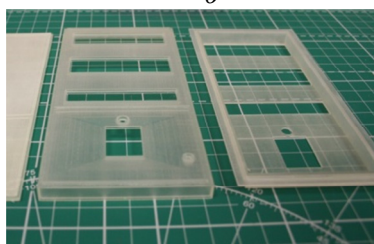
г



д



е



ж

Рис. 5. Напечатанные на 3D-принтере детали конструктора БКТП:
а, б – развертка фундамента-маслямы и боковых стенок БКТП;
в – задний вид боковой стеновой плиты маслямы; *г, д* – развертка
стен коробки БКТП; *е, ж* – развертка потолочной и половой плит БКТП

Заключение

Конструктор масштабных моделей силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем создается для образовательных и инжиниринговых целей. Целая команда студентов и молодых ученых УралЭНИН кафедры АЭС трудится над созданием полного парка масштабных моделей силового оборудования, которое в перспективе планируется сделать рабочим. На данном этапе открыта производственная лаборатория, в которой создаются условия для серийного производства элементов конструктора электроэнергетических систем значительными тиражами.

1. Vozisova O., Egorov A., Trembach A. Electric Power Systems KIT. Siemens 3API DT 145kV Circuit-Breaker / Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698. P. 699–703.

2. Vozisova O., Bannykh P., Koksharova E., Zhavrid N., Trembach A., Baltin D., Kazantsev A., Kunshin V., Murashev D., Tavlintsev A., Eroshenko S., Kuzin P. Electric power systems kit. 2nd International Conference on Advances in Energy and Environmental Science, ICAEES 2014; Guangzhou; China; 21–22 June 2014. Advanced Materials Research. 1008–1009. P. 1166–1170.

3. Borovikov Yu. S., Sulaimanov A. O. Information and Control System for Use in the Real Time Multiprocessor Simulation of Power Equipment // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84. No. 5. P. 290–295.

4. Baranov P. F., Muravjev S. V., Sulaymanov A. O., Khudonogova L. I. Software for emulating the sampled values transmission in accordance with IEC 61850 standard // 2nd International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation (3CA 2013): proceedings, Singapore, December 1–2, 2013. Paris: Atlantis Press, 2013. P. 478–481. Mode of access: <http://www.atlantis-press.com/php/pub.php?publication=3ca-13>.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ КРУПНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ СОЧЕТАНИИ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ И ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

О.В. Газизова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова

Магнитогорский государственный технический университет,
Магнитогорск

Положения внедряемой в настоящее время политики энергосбережения требует повышения надежности систем электроснабжения с целью снижения энергозатрат в аварийных условиях. Развитие промышленных объектов распределенной генерации делает возможным выход генераторов с двигателями соизмеримой мощности на отдельную с энергосистемой работу. В таких условиях для обеспечения статической устойчивости необходим комплексный подход, позволяющий оценивать устойчивость генераторов и нагрузки при параллельной и отдельной работе с энергосистемой и сложной конфигурацией сети. Разработан программный комплекс, позволяющий оперативно-диспетчерскому персоналу промышленных электростанций прогнозировать подобные режимы и разрабатывать мероприятия по обеспечению устойчивости.

Provisions of the power saving policy being implemented at present require enhancing stability of the power supply systems to reduce power consumption under emergency conditions. The development of the distributed generation industrial units enables the switch of the generators with motors of the comparable power to the non-parallel operation with the power system. To provide static stability under such conditions the complex approach is required since it supports estimation of stability of the generators and load at the parallel and non-parallel operation with the power system and complex network configuration. The developed software complex assists the operative and dispatch personnel of the industrial power stations at forecasting similar modes and developing measures to provide stability.

Условия функционирования и управления системой электроснабжения крупного металлургического предприятия, как правило, тесно связаны с социальной и экономической обстановкой в мире. В настоящее

время в условиях рыночных отношений в энергетике промышленным предприятиям становится выгодным использовать электроэнергию, вырабатываемую собственными электростанциями. Поэтому одной из современных тенденций является увеличение крупными предприятиями собственных генерирующих мощностей, что способствует повышению надежности электроснабжения потребителей, качества выпускаемой продукции и соответствует политике энергосбережения. Однако условия работы системы электроснабжения промышленного предприятия не исключают отделения электростанции от энергосистемы в результате действия противоаварийной автоматики. Поэтому с целью повышения надежности электроснабжения потребителей необходимо определить условия сохранения динамической устойчивости энергоузла в процессе выхода на раздельную работу [1, 2, 3, 4] и статической устойчивости непосредственно при раздельной работе. С целью повышения надежности электроснабжения и с учетом того, что в условиях промышленной системы электроснабжения генераторы и электроприемники могут иметь соизмеримую мощности, при анализе статической устойчивости целесообразен комплексный подход, позволяющий оценить устойчивость не только источников, но и потребителей электроэнергии.

Первоначально, в период развития электроэнергетики, был принят курс на объединение электроэнергетических систем, поэтому научные исследования были ориентированы на расчеты установившихся и переходных режимов крупных энергообъединений. В связи с этим вопросы устойчивости в наибольшей степени изучены применительно к крупным энергосистемам и крайне ограниченно рассмотрены применительно к промышленным системам электроснабжения. Поэтому для крупных промышленных предприятий, имеющих собственные электростанции, является актуальной разработка простых и удобных методов расчета установившихся и переходных режимов, а также оценки устойчивости при автономной работе.

Как известно, запас статической устойчивости генераторов промышленных электростанций должен быть обеспечен оперативно-диспетчерским управлением энергосистемы при параллельной с энергосистемой работе и оперативно-диспетчерским персоналом промышленного предприятия при выходе на раздельную работу. Для прогнозирования статической устойчивости промышленных электростанций в различных режимах требуется соответствующее программное обеспечение. Такой программный комплекс «КАТРАН» [5] разработан на кафедре электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета.

Основной задачей в расчетах статической устойчивости является определение идеального предела выдаваемой генераторами электромагнитной мощности при параллельной работе с электроэнергетической системой и действительного предела при раздельной. Это невозможно без соответствующего математического аппарата, позволяющего производить расчеты установившихся режимов при параллельной и раздельной работе с энергосистемой. При расчете установившихся режимов одним из наиболее удобных методов является модифицированный метод последовательного эквивалентирования. Он применим для расчета установившихся режимов электроэнергетических систем сложной конфигурации, отличающихся сложной иерархией и разнородным составом источников питания и нагрузки. Данный метод положен в основу алгоритма расчета установившихся режимов в программном комплексе «КАТРАН».

Как известно, при раздельной работе электростанции с электроэнергетической системой, параметры режима могут претерпевать гораздо более существенные изменения напряжения и частоты. В процессе математического моделирования режимов это требует учета как статических характеристик регуляторов возбуждения и скорости, так и регулирующего эффекта нагрузки. Если статизм автоматических регуляторов генераторов составляет около 4–5%, то форма статических характеристик нагрузки могут изменяться в широких пределах в зависимости от состава нагрузки. Поэтому при расчете параметров таких режимов необходимо определить состав и соответствующий регулирующий эффект комплексной нагрузки, который в общем случае может быть положительным и отрицательным. В связи с этим для повышения эффективности управления режимами промышленных систем электроснабжения, имеющих собственные электростанции была разработана методика определения регулирующего эффекта комплексной нагрузки потребителей промышленного предприятия с учетом потерь в распределительных сетях, приведенная на рис. 1.

Данная методика была реализована в программном комплексе «КАТРАН». В результате исследования статических характеристик комплексной нагрузки были сделаны выводы о возможности применения обобщенных регулирующих коэффициентов при расчетах установившихся и переходных режимов в системах электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе собственные электростанции. Как показали результаты, для практических расчетов в промышленных сетях могут быть приняты следующие пределы:

- регулирующий эффект активной мощности по частоте 1–2,4;
- регулирующий эффект реактивной мощности по частоте 0,9–2,1;

- регулирующий эффект активной мощности по напряжению 0,1–0,3;
- регулирующий эффект реактивной мощности по напряжению 1,3–2.

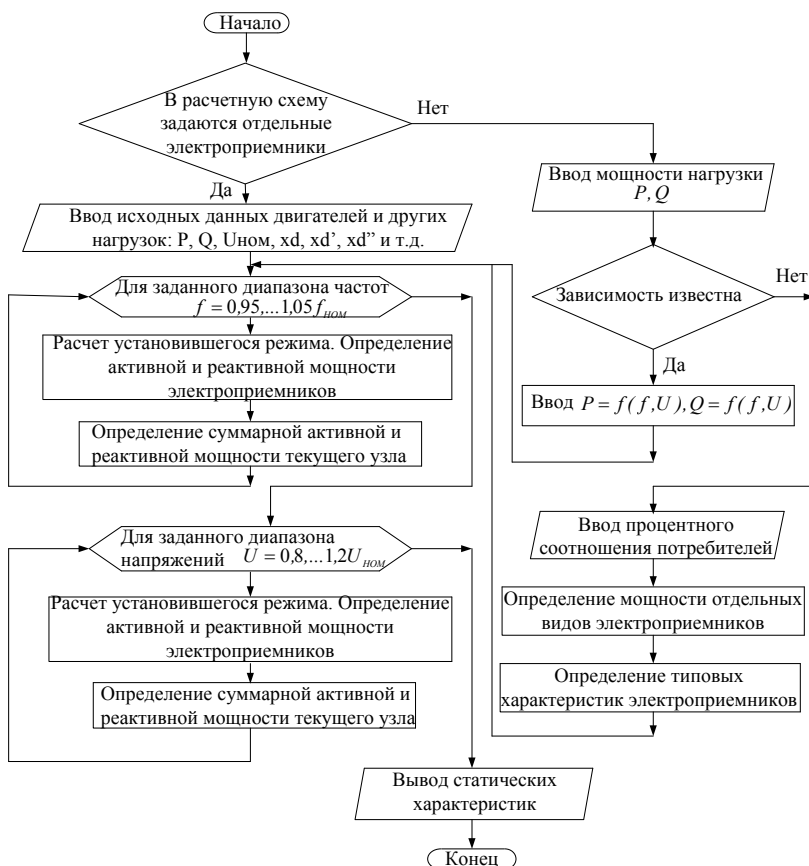


Рис. 1. Методика определения регулирующего эффекта комплексной нагрузки

Как известно, определение наличия статической устойчивости синхронных генераторов возможно методом малых колебаний и с помощью практических критериев статической устойчивости [1]. Но эти подходы не позволяют определить коэффициент запаса статической устойчивости, что актуально при раздельной работе с энергосистемой. Как правило, определение коэффициента запаса производится с использованием

метода последовательного утяжеления. В качестве параметра утяжеления при параллельной работе следует выбрать угол ротора синхронного генератора, а при раздельной – нагрузку. В данной работе используется прямой метод определения запаса статической устойчивости в связи с удобным его сочетанием с принятым методом расчета установившегося режима, то есть определяются параметры режима на каждом шаге утяжеления [6]. По мере утяжеления производятся расчеты режимов до тех пор, пока не будет определено отсутствие сходимости, что при использовании модифицированного метода последовательного эквивалентирования является доказательством предельного установившегося режима [7]. Поскольку расчет установившихся режимов на каждом шаге утяжеления ведется с учетом регулирующего эффекта нагрузки и генераторов, то полученные значения параметров режима являются наиболее корректными. При этом определяется действительный предел передаваемой мощности, поскольку учитывается снижение напряжения в сети совместно с регулирующим эффектом нагрузки. Преимуществом такого расчета является возможность определения запаса статической устойчивости при любой конфигурации сети без составления сложных систем дифференциальных уравнений. Разработанная методика расчета статической устойчивости приведена на рис. 2 и реализована в программном комплексе «КАТРАН».

Поскольку в режимах раздельной работы напряжение и частота могут претерпевать значительные изменения, то интерес представляет устойчивость нагрузки. В общем случае определение статической устойчивости нагрузки сводится к определению критических напряжений электроприемников, при достижении которых они теряют устойчивость или просто отключаются защитой. Определение критических напряжений синхронных и асинхронных двигателей зависит от изменения характеристик электромагнитных мощностей при соответствующих изменениях напряжения, а также коэффициента загрузки, характера момента сопротивления на валу и, в случае синхронных двигателей, тока возбуждения. Только учет совокупность данных факторов даст представление об устойчивости двигателя. Программный комплекс «КАТРАН» позволяет определить коэффициенты запаса статической устойчивости синхронных и асинхронных двигателей при раздельной и параллельной работе узла с энергосистемой.

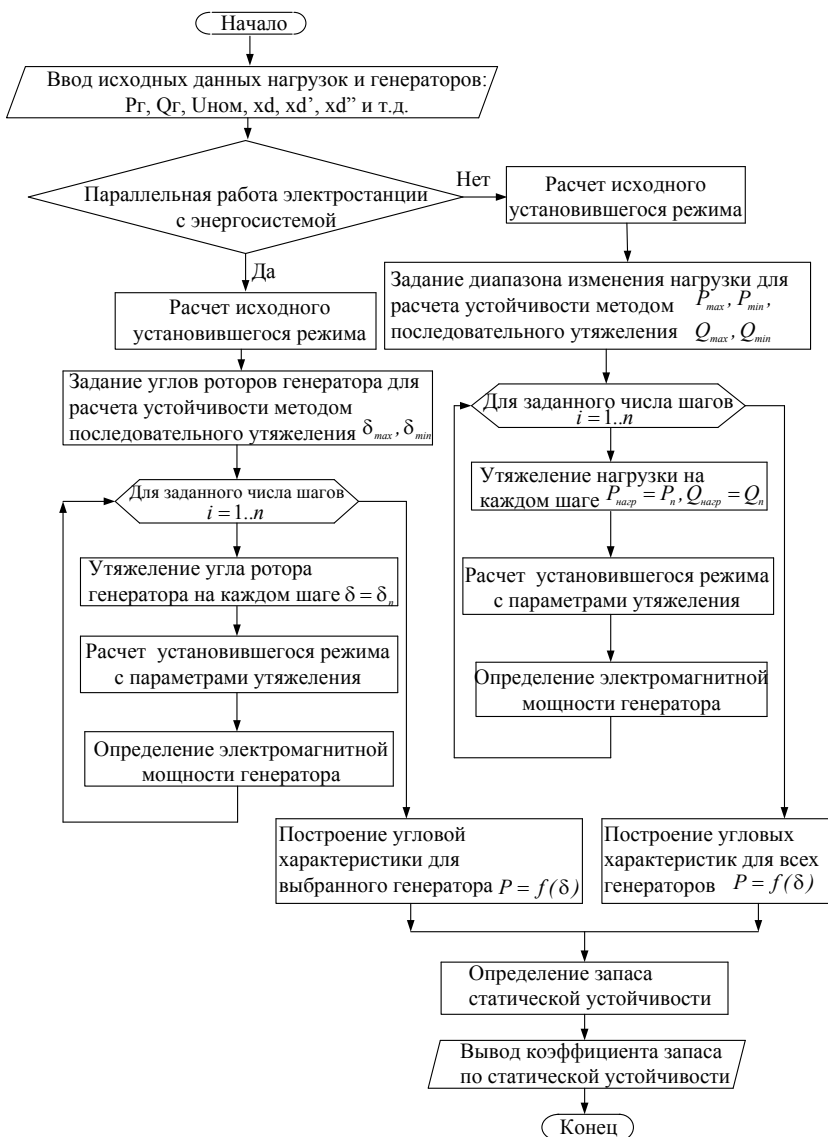


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения запаса статической устойчивости синхронных генераторов по активной мощности

С помощью разработанного программного комплекса исследование производилось для стандартной промышленной электростанции, имеющей связь с энергосистемой, потребителей электрической энергии на генераторном напряжении и генераторы, предназначенные для питания потребителей собственных нужд электростанции. Схема электроснабжения распределительного устройства 3 кВ, получающего питание от генераторов собственных нужд, соединенного с остальной энергосистемой через трансформаторы связи и питающего собственные нужды приведена на рис. 3. Расчеты устойчивости были выполнены с учетом действия автоматического регулирования возбуждения и потолка возбуждения, равному двум, для генератора G1.

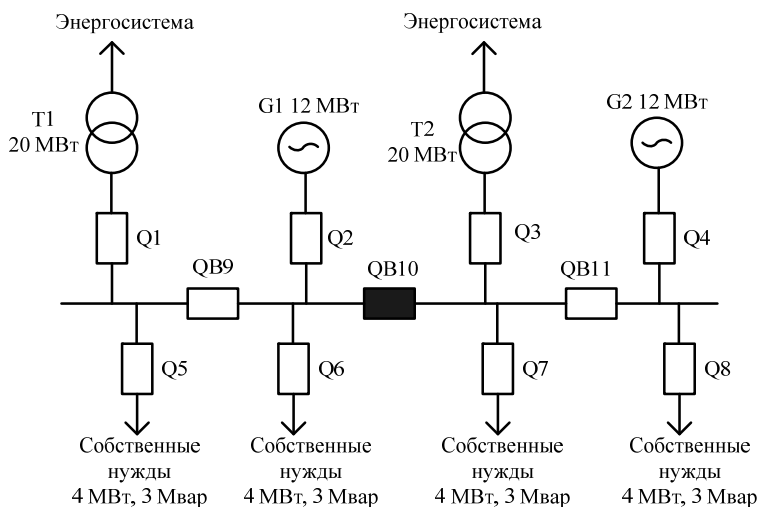


Рис. 3. Исследуемая схема электроснабжения

Угловая характеристика генератора при параллельной с энергосистемой работе, полученная с помощью разработанного программного комплекса, приведена на рис. 4. Коэффициент запаса статической устойчивости в этом режиме составил 67 %. В случае снижения частоты сети или при других неблагоприятных условиях срабатывает делительная противоаварийная автоматика и выводит данный участок сети на раздельную работу с энергосистемой. При автономной работе в установленном режиме получена угловая характеристика, приведенная на рисунок 5. Как видно из полученных результатов, коэффициент запаса статической устойчивости в автономном режиме составляет 63 %. Это

связано с тем, что при параллельной работе генератор выдает активную мощность 12 МВт, а при раздельно около 8 МВт.

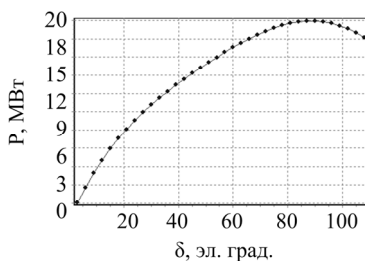


Рис. 4. Угловая характеристика генератора при параллельной работе с энергосистемой

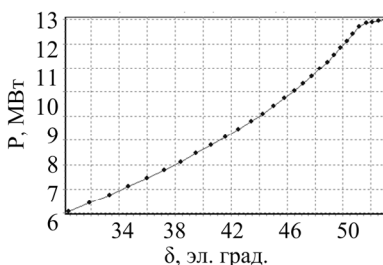


Рис. 5. Угловая характеристика при автономной работе

Таким образом, при наличии быстродействующего автоматического регулирования возбуждения запас по статической устойчивости достаточен для нормальной работы генераторов. Исследования статической устойчивости двигательной нагрузки (на рис. 3 приведена упрощенно) также показали достаточную величину статической устойчивости при работе обоих генераторов в момент отделения от энергосистемы. Необходимо отметить, что аналогичные расчеты могут быть проведены для системы электроснабжения сложной конфигурации с неограниченным числом генераторов и двигателей для промышленных предприятий различных отраслей.

Выводы

Для оперативного управления режимами диспетчерской службой разработан новый алгоритм расчета установившихся режимов автономно работающей системы электроснабжения промышленных предприятий, имеющей в составе собственные электростанции, на основе модифицированного метода последовательного эквивалентирования. Получена усовершенствованная методика определения регулирующего эффекта комплексной нагрузки, предназначенная для анализа нормальных, утяжеленных и послеаварийных режимов в условиях системы электроснабжения промышленного предприятия.

На основе метода последовательного утяжеления разработана методика определения действительного предела передаваемой мощности при параллельной с энергосистемой и автономной работе. Разработанный оригинальный программный комплекс «КАТРАН» позволяет выполнять анализ устойчивости при планировании и оперативном управ-

лении режимами в узлах нагрузки крупных промышленных предприятий, имеющих собственные электростанции. Его использование позволяет задавать ограничения по активной и реактивной мощности, выдаваемой генераторами, при определении экономически целесообразного режима работы электростанции с целью обеспечения устойчивости. Кроме того, для любого промышленного предприятий важным условием надежной работы является составления баланса электропотребления. Разработанная программа позволяет определить критические небалансы мощностей, при которых будет сохраняться статическая устойчивость при выходе на раздельную работу. Использование программного обеспечения дает возможность оперативному персоналу прогнозировать возможность появления аварийных ситуаций, осуществлять своевременное вмешательство в работу систем электроснабжения промышленных предприятий и тем самым повышать надежность и осуществлять энергосбережение.

1. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.

2. Ротанова Ю.Н. Повышение устойчивости системы электроснабжения промышленного предприятия с собственными электростанциями при коротких замыканиях : дис. ... канд. техн.наук: 05.09.03. // МГТУ – Магнитогорск, 2008. 174 с.

3. Заславец Б.И. Представление машин переменного тока в расчетах динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова. // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Серия: Энергетика. 2008. №1 (111). С. 3–8.

4. Kothari D.P. Power System Engineering / D.P. Kothari, I.J. Nagrath. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.

5. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0 / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Газизова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова, Н.А. Николаев, А.В. Кочкина, В.В. Зиновьев. Свидетельство РФ № 2012612069. ОБПБТ – 2012.

6. Буланова О.В. Управление режимами промышленных электростанций при выходе на раздельную работу : дис. на соиск. ст. канд. техн.наук: 05.09.03. МГТУ – Магнитогорск, 2007. 175 с.

7. Буланова О.В. Исследование сходимости метода расчета установившихся режимов систем электроснабжения при работе раздельно

с энергосистемой / О.В. Буланова, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова // Электротехнические системы и комплексы. 2005. № 10. С. 129.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № НК 14-07-00200\14.

РЕКУРСИВНЫЙ ПЕРЕБОР ВЕРОЯТНЫХ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ РЕЖИМНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЭС

С.А. Гусев, В.П. Обоскалов

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Анализ режимной надежности требует чрезвычайно больших вычислительных затрат. На сегодняшний день большая часть исследователей ищет возможности для снижения вычислительной нагрузки. Одним из наиболее многообещающих направлений является перебор аварийных ситуаций (отказов). Эффективность данной процедуры может быть повышена как за счет снижения выборки моделируемых ситуаций, так и за счет применения эффективных вычислительных алгоритмов. В данной статье представлен алгоритм перебора аварийных ситуаций, позволяющий значительно повысить скорость расчета. Он заключается в особом, рекурсивном, формировании очереди отказов. Подход был проверен на 14-узловой тестовой схеме IEEE и показал высокую эффективность.

Security analysis results in an extremely large computational load. To date, most of the researchers are looking for opportunities to reduce the computational load. One of the most promising directions is concerned with contingency search. The effectiveness of this procedure can be improved by both reducing the number of simulated situations and by the use of efficient computational algorithms. This paper presents an approach for contingency search that can significantly increase security calculations. It relies on special, recursive, contingency sorting. The approach has been tested on 14-node IEEE reliability test system and showed almost double decrease of computational time in comparison with typical contingency sorting.

Анализ режимной надежности (РН) заключается в моделировании случайных возмущений и анализе послеаварийных состояний ЭЭС. Каждое состояние проверяется на допустимость режимных параметров и, если хотя бы один из параметров вышел из области допустимых значений, фиксируется выход режима ЭЭС из допустимой области и выполняется расчет оптимальных управляющих воздействий (УВ), возвращающих режим в допустимую область. Критерием оптимизации чаще всего является стоимость УВ [1].

Таким образом, задача оценки режимной надежности ЭЭС сводится к множественному расчету режимов, где в каждом режиме отключены

один или несколько элементов в зависимости от критерия, по которому происходит анализ. Современные исследования и мировой опыт эксплуатации ЭЭС, показывают, что для принятия адекватных и рациональных решений по обеспечению надежности ЭЭС необходимо выполнять анализ режимов по критериям не менее чем $n-2$ или даже $n-3$ [2, 3]. Это объясняется тем, что для ЭЭС относительно большой размерности именно на два или три одновременных отказа приходится максимум математического ожидания ущерба от перерыва электроснабжения.

Необходимость моделировать многократные одновременные отказы элементов ЭЭС чрезвычайно усложняет процедуру оценки РН, т. к. при увеличении количества одновременных отказов, количество анализируемых режимов возрастает в соответствии с выражением (1):

$$N = \sum_{k=1}^m C_n^k = \sum_{k=1}^m \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad (1)$$

где n – количество элементов ЭЭС, k – размер комбинации одновременно отказавших элементов (РКООЭ), m – максимальное количество одновременно отказавших элементов (МКООЭ).

Данное обстоятельство определяет одну из основных проблем РН: с одной стороны, для получения точной и адекватной оценки РН, требуется проанализировать все возможные комбинации элементов ЭЭС, а, с другой стороны, оценка РН должна выполняться достаточно быстро для того, чтобы результаты не потеряли свою актуальность. Данная проблема хорошо иллюстрируется следующим примером. Допустим, требуется оценить математическое ожидание ущерба от недоотпуска электроэнергии по критерию $n-2$ для крупной системы, имеющей 1000 узлов. При среднем количестве присоединений равном 1,5, количество ветвей составит 1500. Если моделировать только отказы ветвей и не учитывать возможность отказа узлов, то, в соответствии с формулой (1), потребуются рассчитать 1 124 250 состояний. Если на расчет одного состояния отводится 1 секунда, то расчет займет более 300 часов.

Однако следует учитывать, что не все комбинации одновременно отказавших элементов (КООЭ) являются значимыми, другими словами, оказывающими значимое влияние на суммарное математическое ожидание ущерба от перерыва электроснабжения. Для снижения затрат машинного времени желательно исключить из рассмотрения те комбинации, которые практически не влияют на результирующие показатели. Существует несколько подходов к задаче исключения малозначачих комбинаций:

- метод отсеивания [4];
- метод ранжирования [4];

- метод, использующий обучающиеся нейронные сети [5];
- метод сингулярного разложения [6].

Метод отсеивания основан на прямом методе отбора (ПМО). Суть метода заключается в быстром расчете всех возможных послеаварийных режимов по упрощенной модели, например, по модели постоянного тока $P-\delta$ или по линеаризованной раздельной модели уравнений узловых напряжений. Однако данный метод лишь проверяет допустимость послеаварийного режима, но не ранжирует режимы по степени тяжести. Следовательно, основным недостатком данного метода является большая размерность результирующей выборки значимых ситуаций. Фактически эта выборка содержит много режимов оказывающих слабое влияние на результирующие показатели надежности.

Метод индексного ранжирования, также известный как PI -метод (PI method), выполняет сортировку тяжести послеаварийного режима (ПАР) по определенному критерию. Высокую точность дает использование в качестве критерия математического ожидания ущерба. Отказы ранжируются по характеристическому индексу:

$$PI = \sum_{i \in I} \omega_i |f_i(x)|^m, \quad (2)$$

где m – показатель степени, значение которого рекомендуется принимать равным 2 и более; ω_i – весовые коэффициенты, устанавливаемые опытным путем; $f_i(x)$ – линейная функция аргумента x , которая обычно в зависимости от контролируемых параметров режима записывается в виде (P_i/\bar{P}_i) либо $(\Delta V_i/\Delta \bar{V}_i)$, либо $(\Delta Q_i/\Delta \bar{Q}_i)$ соответственно для потоков активной мощности, либо изменений модулей напряжения узлов, либо инъекций реактивной мощности генераторных узлов по отношению к предельным значениям; I – множество линий и (или) узлов схемы.

PI -индекс рассчитывается при помощи ПМО. Основным недостаток метода ранжирования связан с значениями показателя степени m и весовых коэффициентов ω_i , т. к. их выбор выполняется эмпирически, либо на основе экспертных оценок, что вносит возможные погрешности в метод. Также необходимо отметить, что этот метод требует больших вычислительных затрат.

Подход, основывающийся на использовании искусственных нейронных сетей, позволяет после проведения обучения сети выполнять ранжирование аварий по степени их тяжести. Однако необходимо учитывать, что качество результата напрямую зависит от качества обучения. Результат анализа не вызывает сомнений, только в том случае, когда на вход искусственной нейронной сети подается ситуация, которая встре-

чалась при обучении. Если же ситуация, подаваемая на вход искусственной нейронной сети, отличается от присутствовавших в обучающей выборке, то результат получается на основании обобщения. Способность обобщать зависит от качества обучающей выборки. Необходимо отметить, что, использование громоздких выборок (с целью включения большего количества ситуаций) замедлит скорость работы нейронной сети.

Для определения наиболее значимых аварий при анализе статической устойчивости по напряжению возможно использовать сингулярный анализ. Считается, что минимальное сингулярное значение матрицы Якоби может быть хорошим показателем близости текущего установившегося режима ЭЭС к предельному по статической устойчивости по напряжению. При этом максимальная компонента сингулярного вектора, объединенного с минимальным сингулярным значением матрицы Якоби, позволяет установить точку наиболее вероятного возникновения коллапса напряжения. Однако этот метод не позволяет учесть в расчетах термическую стойкость и пропускную способность ЛЭП, что и является основным недостатком метода.

Основываясь на вышесказанном, можно сделать заключение, что наилучшие результаты, с точки зрения точности расчетов, дает метод ранжирования. Также как и метод отсеивания, метод ранжирования основан на ПМО. Все методы, основанные на ПМО, рассматривают все возможные КООЭ, за исключением комбинаций с большим значением РКООЭ, если комбинация с меньшим значением РКООЭ не оказывает значительного влияния на результирующее математическое ожидание (МО) ущерба потребителям от недоотпуска электрической энергии.

Типовой алгоритм перебора КООЭ, используемый в алгоритме ПМО, представлен на рис. 1. В постановке, представленной на рис. 1, перебор выполняется «слоями» – сначала, на первом «слое», происходит перебор всех возможных КООЭ размерностью в 1 элемент, затем выполняется перебор комбинаций размерностью в 2 элемента и т. д., пока размерность комбинации не достигнет максимально-допустимой или количества элементов в ЭЭС. Следовательно, перебор КООЭ выполняется в «горизонтальном» направлении.

Следует отметить, что задача расчета режима ЭЭС при оценке РН может быть представлена в прямой и оптимизационной постановке [7]. Оптимизационная постановка позволяет значительно расширить область расчетных режимов, однако требует больше времени для получения решения, поскольку здесь, как правило, используется стандартный солвер, направленный на решение широкого класса задач.

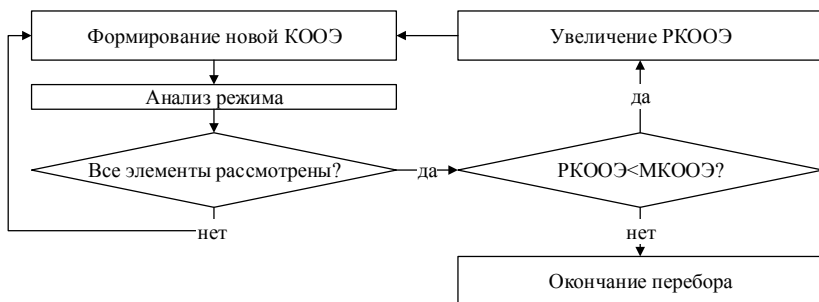


Рис. 1. Типовой алгоритм перебора КООЭ

Как известно из теории оптимизации нелинейных функций, скорость получения решения и его точность во многом зависит от выбранного начального приближения. Как правило, хорошим начальным приближением для режимов второго «слоя» являются соответствующие режимы первого «слоя», например, для режима с одновременно отключенными элементами i и j начальным приближением может являться режим с отключенным элементом i . При использовании типового алгоритма перебора КООЭ придется либо использовать многомерные массивы или сложные схемы адресации к базе данных для сохранения информации о режимах предшествующего «слоя», либо использовать типовые начальные приближения. Альтернативным решением является использование алгоритма рекурсивного перебора КООЭ, представленного на рис. 2.

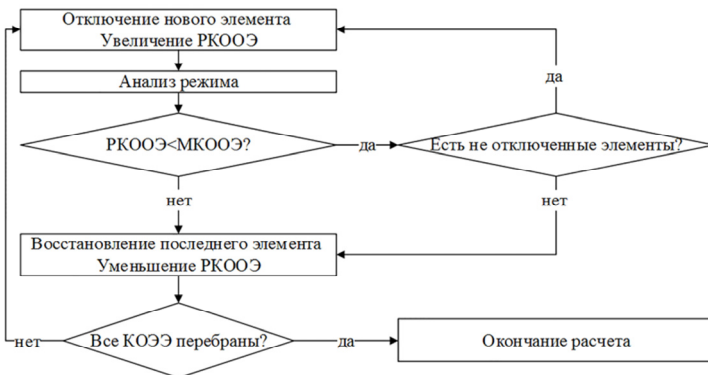


Рис. 2. Рекурсивный алгоритм перебора КООЭ

При использовании такого подхода переход на следующий «слой» происходит непосредственно после анализа одной комбинации на текущем «слое». С каждым «слоем» анализируемая комбинация расширяется, пока не достигнет максимально-допустимого размера или включит в себя все элементы ЭЭС. После этого происходит восстановление одного из элементов в комбинации по принципу обратной очереди (LIFO, last in first out). Далее комбинация снова расширяется за счет нового отключенного элемента. Рекурсивный процесс продолжается пока не будет выполнен перебор всех элементов ЭЭС. Таким образом, в данном подходе перебор КООЭ выполняется в «вертикальном» направлении.

Программная реализация рекурсивного перебора выполняется посредством рекурсивного обращения к расчетной процедуре (обращение процедуры к самой себе) с новыми входными параметрами (с новой КООЭ).

Использование рекурсивного подхода при переборе КООЭ позволяет хранить информацию о режимах верхних «слоев» в двумерном массиве, а также минимизировать число операций при пересчетах матрицы проводимостей. Кроме того, в такую постановку задачи хорошо интегрируются расчетные методы исключения не значащих КООЭ. Для этого необходимо после блока проверки наличия не отключенных элементов, по ветви «да» вставить блок проверки величины приращения МО ущерба при текущем РКООЭ. Если приращение меньше определенного (предварительно заданного или рассчитанного относительно МО ущерба первого «слоя») базового значения, комбинация считается незначимой и увеличения РКООЭ не происходит, выполняется шаг восстановления последнего элемента в КООЭ и уменьшение РКООЭ. Следует отметить, что в данном случае максимальная размерность КООЭ будет динамической. Это означает, что для некоторых комбинаций максимальный допустимый размер КООЭ будет составлять, например 4, в то время как для других, менее значимых КООЭ, значение МРКООЭ будет ограничено, например 3. Это также является интересной особенностью в сравнении с типовым перебором, когда глубина моделирования является неизменной.

Для проверки представленного алгоритма, была выполнена оценка надежности схемы IEEE 14-bus RTS по критериям $n-1$, $n-2$, $n-3$ и $n-4$. Расчет был выполнен в соответствии с алгоритмом ПМО. Рекурсивный подход к перебору КООЭ был сравнен с типовым подходом. В качестве критерия сопоставления использовалось время расчета. Результаты расчетов представлены в таблице.

Расчет был выполнен на двухъядерном процессоре Intel Core 2 Duo e8200 с тактовой частотой 2,66 ГГц, в среде математического моделиро-

вания Matlab, использовался солвер fmincon (солвер нелинейного программирования с учетом ограничений), алгоритм sqr (последовательное квадратичное программирование).

Как видно из данных таблицы, рекурсивный перебор КООЭ позволяет снизить время расчета практически в два раза, что подтверждает эффективность предлагаемого алгоритма.

Таблица

Результат вычислительного эксперимента

Количество одновременно отказавших элементов	1	2	3	4
Время расчета (типовой перебор КООЭ), сек.	25,4	354	4231	33238
Время расчета (рекурсивный перебор КООЭ), сек.	16,9	250	2492	16804

Заключение

Решение задачи оценки режимной надежности в полной постановке крайне затруднительно. Необходимо снижать объем вычислений за счет уменьшения количества анализируемых комбинаций и использования эффективных расчетных процедур. В статье представлен рекурсивный алгоритм перебора комбинаций одновременно отказавших элементов, который позволяет значительно повысить эффективность решения задачи оценки РН ЭЭС и может быть использован при моделировании множественных отказов элементов ЭЭС. Однако для наиболее эффективного решения задачи РН ЭЭС, представленный алгоритм необходимо использовать в комбинации с другими подходами, обеспечивающими снижение объема вычислений.

1. Billinton R., Allan R. Reliability evaluation of power systems. Plenum Press, 1987.

2. Методы и модели исследования надежности электроэнергетических систем. Сыктывкар, 2010. 292 с.

3. Будовский В.П., Шульгинов Н.Г. Оперативный анализ надежности схем распределительных устройств энергосистем // Новое в Российской энергетике. 2004. № 10. С. 6–15.

4. Cheng C.S., Feng Xia. Performance evaluation of static security analysis methods // IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 9, No. 3. Aug. 1994. P. 1441–1449.

5. Malik N., Srivastava L. Knowledge-based neural network for line flow contingency selection and ranking // Asian conference on Intelligent system and network, Harnana engineering college. Feb. 2006. P. 64–67.

6. Гамм А.З., Голуб И.И. Сенсоры и слабые места в электроэнергетических системах. Иркутск, 1996. 96 с.

7. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М. Оптимизационная модель предельных режимов электрических систем // Электричество. 2010. № 11. С. 2–12.

Благодарности

Эта работа финансово поддерживается Министерством науки и образования Российской Федерации.

ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

В.О. Зырин

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург

В статье рассмотрены основные технологии добычи высоковязкой нефти, приведена структура электротермического комплекса с забойными электропарогенераторами. Проведен анализ экономической эффективности предлагаемой технологии по сравнению с традиционной. Приведена программа расчета основных параметров электропарогенератора, зависимости конструктивных параметров от начальных условий.

The paper shows main technologies for heavy oil recovery, structure of electrothermal complex with downhole electrosteam generator are proposed. Economical evaluation of new technologies are made. Paper considered program for main constructive parameters calculation.

В последние десятилетия нефтедобывающая отрасль России столкнулась с рядом проблем, связанных с падением проектной нефтеотдачи. Этот процесс объясняется ухудшением структуры запасов, увеличением доли трудноизвлекаемой части, что особенно актуально для старых нефтедобывающих регионов с высоким промышленным потенциалом, развитой инфраструктурой, таких как Западная Сибирь, где большинство из месторождений находится в поздней стадии разработки и нефтеотдача на них неуклонно снижается.

В условиях спада объема добычи нефти особую важность приобретает освоение широко распространенных залежей высоковязкой нефти (ВВН), мировые запасы которой приблизительно в 7 раз превышают запасы легкой нефти. По запасам ВВН Россия (7 млрд т) находится на третьем месте после Канады и Венесуэлы. Относительно географии запасов высоковязких нефтей и природных битумов (ПБ) следует отметить то, что бассейны с этими углеводородами распространены в основном на европейской территории России: Волго-Уральский, Днепровско-Припятский, Прикаспийский и Тимано-Печорский. Из них можно выделить наиболее известные, изученные и разрабатываемые месторождения, такие как Усинское и Ярегское (Республика Коми), Гремихинское, Мишкинское, Лиственское (Республика Удмуртия), Южно-Карское,

Зыбза-Глубокий Яр, Северо-Крымское (Краснодарский край), Ашальчинское и Мордово-Кармальское (Республика Татарстан).

Кроме огромных запасов энергоресурса, ВВН является источником ценных попутных компонентов, таких как ванадий, никель. Изучение состава получаемых металлов показало их высокую чистоту, поэтому многие развитые страны осуществляют проекты по добыче ценных металлов из тяжелой нефти.

В Республике Коми (РК) сосредоточены в крупных и мелких месторождениях ВВН более 50 % всех запасов. Самой крупной залежью высоковязкой нефти является Усинское месторождение, запасы которого составляют 500–600 млн. т. В то же время запасы малых месторождений в РК составляют приблизительно 40–50 %.

Проектом развития пермокарбоновой залежи Усинского месторождения предусмотрено увеличение годовой добычи в 4 раза (до 4 млн т), закачки пара в пласт – более чем в 10 раз. Запасы ВВН этого месторождения составляют 500–600 млн. т. Значимость этой задачи также подтверждается планом развития Республики Коми, в котором предусматривается внедрение новых технологий добычи нефти, обеспечивающих повышение нефтеотдачи на 30–40 %; наращивание добычи высоковязких, тяжелых, высокопарафинистых и смолистых видов нефти Ярегского и Усинского месторождений за счет применения теплового воздействия на продуктивные пласты [1].

В естественном режиме эксплуатации скважин нефтеотдача не более 6–15 %. Безальтернативными методами повышения нефтеотдачи отечественными и зарубежными специалистами признаны термические методы воздействия на продуктивные пласты, включающие воздействие горячей водой, паротепловое воздействие, импульсно-дозированное воздействие и т. п.

В России наиболее масштабным проектом по добыче высоковязкой нефти является технология паротеплового воздействия, реализованная на Усинском месторождении Республики Коми. С августа 1992 года ведется разработка этого месторождения с применением технологии пароциклической обработки, что позволило достигнуть нефтеотдачи 25 % на начальном этапе при паронефтяном отношении 3,5...4,5 [2]. Технология заключается в производстве пара в наземном парогенераторе, работающем на сжигании газа, и дальнейшую закачку пара по системе теплоизолированных труб на забой скважины.

Кроме того, крупными нефтяными компаниями постоянно ведутся поиски новых технологий, испытываются технологии SAGD, проекты по использованию монотоплива и попутного нефтяного газа.

Для повышения эффективности тепловой обработки в Национальном минерально-сырьевом университете «Горный» был создан ряд конструкций забойных электронагревательных устройств и электропарогенераторов, а также спроектирован электротермический комплекс для добычи высоковязкой нефти.

Комплекс (рис. 1) позволяет выполнять технологические операции по паротепловому воздействию (ПТВ), импульсно-дозированному тепловому воздействию (ИДТВ) и термогидродинамическому воздействию. Для этого в состав электротермического комплекса включены устройство тепловой обработки призабойной зоны, насос с регулируемым электроприводом, емкость с котловой водой, насосно-компрессорные трубы (НКТ), водоподающий узел с обратным клапаном. Автоматическое поддержание заданных технологических параметров (напряжение U , ток I , расход котловой воды q , частота вращения насоса ω) обеспечивается системой управления СУ.

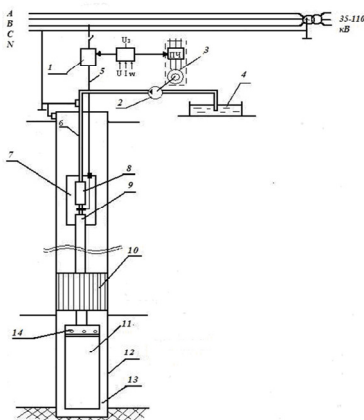


Рис. 1. Схема электротермического комплекса:

- 1 – регулятор тока; 2 – насос; 3 – регулируемый электропривод;
- 4 – рабочая жидкость; 5 – силовой кабель; 6 – насосно-компрессорные трубы; 7 – маслозаполненное вводное устройство; 8 – диэлектрическая вставка; 9 – термостойкий токовод; 10 – термостойкий пакер;
- 11 – скважинный электродный нагреватель; 12 – обсадная колонна;
- 13 – пластовая жидкость; 14 – паровыпускное отверстие

Конструкция устройства тепловой обработки призабойной зоны скважин (рис. 2) [3], размещенного в зоне продуктивного пласта внутри

эксплуатационной колонны 10, включает в себя скважинный электропарогенератор-сепаратор, который закреплен на конце колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) 17. Он состоит из металлического корпуса 1, выполненного в форме цилиндра и являющегося нулевым электродом. Центральный токовод 3, имеющий термостойкую изоляционную оболочку 2, закреплен в верхней части корпуса 1 через проходной изолятор 18, на внутренней поверхности корпуса 1 расположены в виде стальных колец отбойные конденсатосъемники 12. Внутри корпуса 1 на токовом 3 через равные промежутки, разделенные трубчатыми термостойкими изоляторами 2, установлены по высоте один над другим фазные электроды 5, каждый фазный электрод выполнен в виде многозаходного винта с углом атаки лопастей 200–400, применяемых для закручивания конвективного потока 9 вокруг оси с целью получения тангенциальной составляющей скорости и сепарации пара. Межэлектродное расстояние определяется мощностью устройства, питающим напряжением, поверхностной плотностью тока и удельным сопротивлением токопроводящей жидкости. Каждый фазный электрод помещен во фторопластовый керамический стакан, имеющий боковую стенку 6 и токопроводящие окна 7. Верхняя часть корпуса 1, свободная от фазных электродов и образующая паровую зону 14 электронагревателя, содержит паровыводящий канал 15 с клапаном 16.

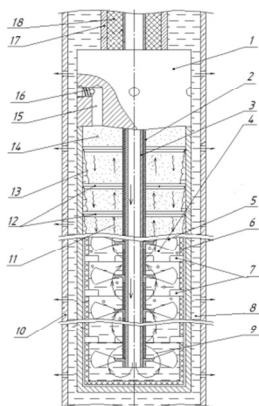


Рис. 2. Скважинный электропарогенератор-сепаратор

За счет того, что фазные электроды 6 выполнены в виде многозаходного винта с углом атаки лопастей 45°, происходит закручивание вокруг оси потока выходящей паровоздушной смеси. Это приводит к разделению смеси вдоль радиальной составляющей. Центральная паровая область

будет иметь большую сухость, т. к. за счет тангенциальной составляющей скорости взвешенные, более инерциальные микрокапли будут выноситься на периферию, где они конденсируются и задерживаются с помощью стальных отбойных конденсаторосъемных колец 5.

Для оценки эффективности применения проведено экономическое сравнение традиционной (ТТ) и электротермической (ЭТ) технологии [1].

Сравнительную оценку энергетической и экономической эффективности можно получить из условия равенства вносимой в продуктивный пласт удельной тепловой энергии и реализуемой нефти рассматриваемых способов термического воздействия.

При сравнении приняты следующие экономические показатели:

- курс доллара 69 руб. (на 30.01.2015);
- цена нефти 50 \$ за баррель (на 30.01.2015);
- стоимость электроэнергии: 3004 руб./МВт×ч (ОАО «Коми энерго-бытовая компания» на декабрь 2014):
- число рабочих часов в году – 7000;
- часовой расход пара – 20 т.

Очевидно, что рассматриваемые варианты становятся экономически равноценными по статье «стоимость энергоносителей» при равенстве стоимостей сожженного топлива в ТТ и затраченной электроэнергии в ЭТ:

$$C_{\text{НС}} = C_{\text{ЭЛ}} \cdot W_{\text{ЭПГ}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{ЭЛ}}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии.

$C_{\text{ЭЛ}}$ при паронефтяном факторе 1 и стоимости 1 т нефти 20 560 руб. равна:

$$C_{\text{ЭЛ}} = \frac{C_{\text{НС}}}{W_{\text{ЭПГ}}}, \text{ руб / кВт} \cdot \text{ч}, \quad (2)$$

где $C_{\text{НС}}$ – стоимость сожженной нефти.

Общее выражение для вычисления стоимости электроэнергии $C_{\text{ЭЛ}}$ при различных значениях ПНФ = k:

$$C_{\text{ЭЛ}} = \frac{k \cdot C_{\text{Н}} \cdot q_{\text{Н}}'}{(1 - k \cdot q_{\text{Н}}') \cdot W_{\text{п}} \cdot k} = \frac{C_{\text{Н}} \cdot q_{\text{Н}}'}{(1 - k \cdot q_{\text{Н}}') \cdot W_{\text{п}}} \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}, \quad (3)$$

где $C_{\text{Н}}$ – стоимость 1 т нефти, k-ПНФ, $W_{\text{п}}$ – расход электроэнергии в ЭПГ на производство 1 т пара, $q_{\text{Н}}'$ – удельный часовой расход нефти (т) на 1 т пара.

Традиционная термическая технология

1. Количество дополнительно добытой нефти за 1 год:

$$Q_{\text{НГ}} = Q_{\text{НП}} = Q_{\text{П}} \cdot T_{\text{Г}} \cdot \text{ПНФ} = 20 \cdot 7000 = 140\,000 \text{ т} \quad (4)$$

2. Количество сожженного топлива:

$$Q_{\text{НС}} = q_{\text{Н}} \cdot T_{\text{Г}} = 1,5 \cdot 7000 = 10\,500 \text{ т} \quad (5)$$

3. Количество реализованной нефти:

$$Q_{\text{НР}} = Q_{\text{НГ}} - Q_{\text{НС}} = 140\,000 - 10\,500 = 129\,500 \text{ т} \quad (6)$$

4. Годовая стоимость сожженной нефти:

$$C_{\text{НС}} = C_{\text{Н}} \cdot Q_{\text{НС}} = 21\,000 \cdot 10\,500 = 270 \cdot 106 \text{ руб.} \quad (7)$$

Электротермические технологии.

1. Затраты электроэнергии для генерации 1т пара в ЭПГ при давлении 12 МПа со степенью сухости 0,5:

$$W_{\text{ПЭ}} = 520 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т} = 0,52 \text{ МВт} \cdot \text{ч/т} \quad (8)$$

2. Годовые затраты электроэнергии на добычу количества нефти, равной количеству нефти реализованной при ТТТ (ПНФ = 1):

$$W_{\text{ЭГ}} = Q_{\text{НР}} \cdot W_{\text{ПЭ}} \cdot \text{ПНФ} = 129\,500 \cdot 0,52 \cdot 1 = 67\,340 \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (9)$$

3. Годовая стоимость электроэнергии при стоимости 1 кВт·ч равной 3,21:

$$C_{\text{ЭГ}} = W_{\text{ЭГ}} \cdot C_{\text{ЭЛ}} = 67\,340 \cdot 3,27 \cdot 10^3 = 220,1 \cdot 10^6 \text{ руб.} \quad (10)$$

Таким образом, проведенные расчеты подтверждают правомерность применения полученных стоимостей 1 кВт·ч из условия равенства количества и стоимости реализованной дополнительно добытой нефти при традиционной и ресурсосберегающей электротермической технологиях добычи ВВН.

Очевидно, что если стоимость 1,0 кВт · ч фактически потребляемой электроэнергии $C_{\text{ф}}$ ниже стоимости расчетной $C_{\text{эл}}$, то ЭТТ по статье «стоимость энергоносителей» становится менее затратной, чем ТТТ.

Годовой экономический эффект при этом определяется выражением:

$$\mathcal{E}_{\text{Г}} = (C_{\text{эл}} - C_{\text{ф}}) W_{\text{ЭГ}}, \text{ руб.} \quad (12)$$

Принимая в рассматриваемом примере $C_{\text{ф}} = 3,004 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}$ при расчетной $C_{\text{р}} = 3,75 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}$, годовой экономический эффект составит:

$$\mathcal{E}_{\text{Г}} = (3,75 - 3,04) \cdot 10^3 \cdot 67\,340 = 47,76 \text{ млн руб.}$$

Таким образом, доказано, что при равной стоимости энергоносителей и количестве реализованной нефти электротермическая технология является более эффективной и может применяться в качестве альтернативы наземным парогенераторам на месторождения высоковязкой нефти.

В ходе анализа зависимостей удельного сопротивления воды от температуры нагрева была составлена программа расчета основных параметров забойного электропарогенератора.

Исходными данными для определения основных термодинамических и конструктивных параметров ЭПГ являются:

1. Тип погружной кабельной линии
2. Напряжение питания ЭПГ – кВ

3. Диаметр ЭПГ – мм
4. Глубина установки ЭПГ – м
5. Давление нагнетания пара в пласт – МПа
6. Зависимость удельного сопротивления котловой воды от температуры – $\rho = f(T)$

В соответствии с этими данными программа расчета основных параметров будет выглядеть следующим образом.

1. Задается мощность нагрева P (кВт) с учетом ограничения со стороны кабельных линий.

2. Определяется номинальный ток I_n $I_n = P_n / U_n$. Так как рассматриваемый вариант ЭПГ получает питание по однофазной схеме «фаза – ноль», то номинальный ток кабеля при включении токоведущих шин параллельно $I_n = 3I_k$, где I_k – номинальный ток токоведущей жилы кабеля.

3. Задается диаметр СЭН в соответствии с диаметром обсадной колонны в зоне продуктивного пласта – D (мм).

4. Длина СЭН определяется технологическими условиями.

5. По заданному давлению нагнетания пара, равному давлению внутри ЭПГ, по таблицам состояния «вода – пар» определяется удельная энергия нагрева воды до кипения при этом давлении W_k (кДж/кг) и парообразования W_n (кДж/кг). Определяется плотность рабочей жидкости при температуре кипения.

6. Определяются коэффициенты долевого распределения удельной энергии пара на нагрев до температуры кипения $k_k = \frac{W_k - W_0}{W_n}$ (W_0 –

начальная энергия воды) и на производство пара $k_n = \frac{W_n - W_k}{W_n}$

7. Определяется номинальная мощность на интервале I $P_k = k_k P_n$ и мощность на интервале II $P_n = k_n P_n$.

8. По номинальной мощности ЭПГ и заданной сухости пара x определяется часовая паропроизводительность ЭПГ

$$Q = P_n \frac{3600}{W_k + x(W_n - W_k)}.$$

9. По диаметру обсадных труб принимается наружный диаметр ЭПГ. По известной толщине стенки корпуса δ_1 , толщине изоляции внутреннего корпуса δ_2 определяется внутренний диаметр ЭПГ $D_{вн}$. $D_{вн} = D - 2(\delta_1 + \delta_2)$ (рис. 3)

10. По внутреннему диаметру токовода, толщине изоляции определяется диаметр токовода в изоляции d_t . Определяется площадь

$$\text{проточной части ЭПГ } S_{pr} = \frac{\pi(D_{\text{вн}}^2 - d_t^2)}{4}.$$

11. Принимается межэлектродное расстояние l_e , но не менее 100 мм, мощность на одном участке P_0 . Определяется сопротивление межэлектродного интервала $R_0 = \frac{U_n^2}{P_0}$.

12. Рассчитывается площадь электрода $S_3 = \frac{l_3 \cdot \rho}{R_0}$.

13. Для предотвращения процесса электролиза плотность тока на электродах j должна быть меньше 2 А/см². Проводится проверка рассчитанной площади на это условие.

$$j = \frac{I_n}{S_3} = \frac{U_n}{R_0 \cdot S_3} < 2 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$$

14. Расчет числа межэлектродных интервалов для участка нагрева до температуры кипения.

15. Определяется число промежутков на интервале парообразования.

На основании полученной программы получены зависимости конструктивных параметров от начальных условий.

При расчете площади электродов учитывается один важный для процесса электронагрева жидкости параметр – плотность тока на электродах.

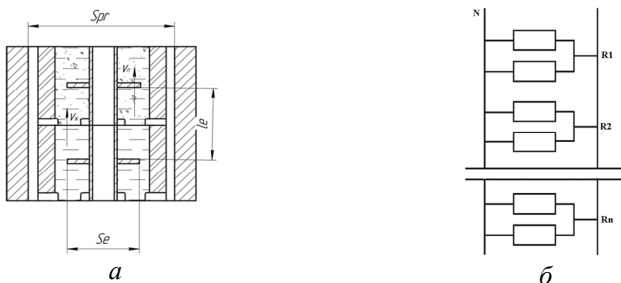


Рис. 3. *a* – расчетная схема межэлектродного промежутка ЭТГ;
б – электрическая расчетная схема

Процесс нагрева жидкости сопровождается сложными электрохимическими реакциями, проходящими на электродах. Результатами этих реакций является образование вредных веществ, разложение воды на

водород и кислород, которые смешиваясь образуют взрывоопасный газ. Избежать этих процессов можно, выполнив правильный выбор материалов электрода и недопущением превышения допустимой величины плотности тока на электродах. Для изготовления электродов самыми лучшими считаются нержавеющая сталь, титан.

Плотность тока на электродах определяется максимальным током и площадью электрода:

$$j = I/s. \quad (13)$$

При использовании обычной стали допустимое значение плотности тока для плоских электродов составит $0,5 \text{ A/cm}^2$, а для цилиндрических – 2 A/cm^2 .

При малой глубине залегания (до 900 м) (рис. 4) наблюдается значительно большее распределение энергии на интервале кипения (рис. 3), объясняющийся ростом температуры кипения (от 230 до 350 °С). На глубине 900 м мощности распределяются практически поровну между интервалом нагрева и интервалом парообразования.

Достигнув 1000 м уменьшается энергия на парообразование и мощность на этом интервале.

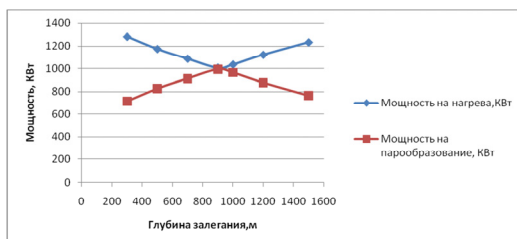


Рис. 4. Распределение установленной мощности по интервалам в зависимости от глубины залегания пласта

Таким образом, можно сделать вывод: с увеличением глубины залегания пласта изменяется распределение мощности на интервалах – увеличивается мощность на интервале нагрева и уменьшается мощность парообразования. Вместе с этим изменяется и число межэлектродных промежутков.

-
1. Загривный Э.А. Влияние работы забойных электротермических комплексов на качество электрической энергии / Э.А. Загривный, В.И. Маларев, Д.А. Устинов, В.О. Зырин // Электротехника, 2011. № 10. с. 27–31.

2. Пат. № 2451158. Устройство для тепловой обработки призабойной зоны скважины-электропарогенератор / Э.А. Загривный, В.И. Маларев, О.Б. Лакота, В.О. Зырин; от 22.11.2010.

3. Загривный Э.А. Автоматизация электротермического комплекса с забойным парогенератором для повышения нефтеотдачи пластов с высоковязкой нефтью / Э.А. Загривный, В.И. Маларев, В.О. Зырин // Записки Горного института. 2011. Т. 192. С. 125–130.

СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ЗАДАЧИ ЭНЕРГОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Е.С. Кочнева, А.В. Паздерин
Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В статье приведено сопоставление традиционной для энергетики задачи оценивания состояния и задачи энергораспределения. Затрагиваются вопросы источников данных, систему равнений состояния, критериев наблюдаемости.

The article presents comparison of the traditional for electricity state estimation problem and energy flow problem on the basic criteria. Issues of data sources, systems of state equations, observability criteria are discussed.

Управление электроэнергетическими системами осуществляется с помощью автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ). Энергосистемы (ЭС) являются объектом сложной структуры с комплексными связями, а также территориально распределены. Связи в структуре энергосистемы изменяются с течением времени, также подвержены изменению и параметры, характеризующие ЭС. В ЭС есть ряд параметров, требующих непрерывного поддержания на определенном уровне, при этом факторы, оказывающие влияние на эти параметры и состояние ЭС в целом, могут носить как случайный, так и систематический характер. Эффективное управление невозможно без точной и достоверной информации об объекте управления. Оценивание состояния (ОС) – это сложная задача, целью решения которой является предоставление информации об объекте управления, то есть о ЭС [1, 2]. Решением являются расчетные оценки всех параметров, описывающих состояние ЭС. Источником данных для проведения расчетов служат системы телемеханики. Оценка параметра соответствует его истинному, либо максимально близкому к нему значению. В отличие от измеренных значений параметров, их расчетные аналоги в точности соответствуют уравнениям состояния.

Чаще всего измеренными параметрами являются перетоки по связям, модули напряжений, активные мощности узлов. Модули и фазы напряжений, соответствующие наименьшим невязкам между расчетными аналогами и самими измерениями, являются решением задачи ОС.

Для решения задачи ОС применяются оптимизационные математические метод, а также уравнения установившегося режима.

Исходными данными для задачи ОС являются схема замещения электрической сети и характеризующие ее параметры. В результате расчетов вычисляются аналоги напряжений (углы и модули), токов и мощностей.

Результаты решения задачи ОС используются для решения целого ряда практических задач: оценивается достоверность измерений, выявляются средства измерений, работающие вне своего класса точности, неизмеряемые параметры дорассчитываются.

Российские и зарубежные ученые работают над теорией ОС более 50 лет [1, 2], разработанные методики и подходы широко используются в практической деятельности.

В исходных данных задачи ОС можно выделить две группы. К первой относятся условно постоянные параметры, характеризующие схему замещения рассматриваемой сети, эти параметра в течение хода решения остаются неизменными. Вторая группа включает в себя быстроизменяющиеся параметры, такие как напряжения, токи и мощности.

В качестве основы формирования системы уравнений состояния задачи ОС традиционно берутся фундаментальные законы электротехники: первый и второй законы Кирхгофа и закон Ома. Зачастую в качестве системы уравнений состояния принимается система уравнений узловых напряжений, записанную в требуемом виде. Например, уравнения состояния задачи оценивания состояния, записанные в форме баланса мощностей в прямоугольной системе координат:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n (g_{ij}(U_i'U_j' + U_i''U_j'') + b_{ij}(U_i'U_j'' + U_i''U_j')) = P_i - g_{i6}U_6U_i' + b_{i6}U_6U_i''; \\ \sum_{j=1}^n (g_{ij}(U_i'U_j'' - U_i''U_j') - b_{ij}(U_i'U_j' + U_i''U_j'')) = -Q_i + g_{i6}U_6U_i'' + b_{i6}U_6U_i', \end{cases} \quad (1)$$

здесь g_{ij} и b_{ij} – составляющие проводимости ветви ij ; P_i и Q_i – составляющие мощности в узле i сети; $U_{i(j)}'$ и $U_{i(j)}''$ – проекции вектора напряжения в узле $i(j)$ на вещественную и мнимую оси соответственно; U_6 – напряжение балансирующего узла с заданной фазой.

Для эффективной работы по управлению ЭС, анализа текущей надежности, обеспечения ведения режима, диспетчеру необходима оперативная информация о параметрах режима, расчетные оценки, полученные в результате решения задачи ОС обеспечивают такие данные.

Фактические измерения отличаются от их расчетных аналогов, различия между вектором измерений и расчетных оценок параметров обу-

словлены текущими погрешностями измерительных приборов и грубыми ошибками в измерениях.

Следующий важный критерий – наблюдаемость, то есть возможность получения решения. Наблюдаемость ОС определяется наличием достаточного количества измерений и определенном расположении на схеме сети. Минимальный набор измерений, обеспечивающий наблюдаемость задачи ОС называется критическим. Исчезновение любого из измерений в критическом наборе приведет к потере наблюдаемости задачи ОС в целом. Из теории ОС известно, что минимальное число измерений, обеспечивающих наблюдаемость равно $(2n - 1)$, где n – число узлов сети.

Современные автоматизированные системы учета электроэнергии позволяют получить синхронизированные измерения потоков активной и реактивной энергий, а также обеспечивают значительную избыточность измерений.

Применение традиционных уравнений установившегося режима для моделирования энергораспределения в сети приводит к появлению довольно значительной методической погрешности. Основных причин появления погрешностей две. Первая состоит в возможности появления топологических изменений в интервале измерений. Вторая заключается в режимных изменениях. Чем более длинным является рассматриваемый интервал измерений, тем более велика вероятность проявления подобных изменений в сети. В связи с этим, предложено в качестве уравнений состояния использовать уравнения балансов электроэнергии, которые являются тождествами при любых схемных и режимных изменениях в сети.

Задача ЭР, ее уравнения состояния, критерии наблюдаемости и подходы к решению достаточно подробно описаны в [3, 4]. Система уравнений состояния задачи ЭР формируется двумя подсистемами: в первую из которых входят уравнения балансов электроэнергии в узлах схемы сети, вторая подсистема состоит из уравнений балансов электроэнергии в ветвях:

$$\begin{cases} W_i - \sum_{j=1}^N W_{ij} = 0, & i = 1, 2, 3, \dots, N; \\ W_{ij} - W_{ji} = \Delta W_{ij}^{\text{tex}}, & ij = 1, 2, 3, \dots, M \end{cases} \quad (2)$$

здесь W_i – узловые потоки электроэнергии; W_{ij} – потоки электроэнергии по линиям, инцидентным узлу i ; N – число узлов в схеме сети; $\Delta W_{ij}^{\text{tex}}$ – технические потери ЭЭ в связи $i-j$; M – число связей в схеме сети. Уравнения балансов дополняются выражениями для расчета технических потерь в ветвях схемы замещения сети. Формула расчета значения тех-

нических потерь зависит от режима работы, а также от доступной измерительной информации. Проведенные расчеты показали, что применение даже упрощенного метода расчета потерь не оказывает значительного влияния на результаты расчетов ЭР.

Потоки электроэнергии, входящие в состав уравнений (2) могут иметь два различных направления: прием и отдача. Величина энергии входит в уравнение в сальдированном виде.

Критерии наблюдаемости задачи ЭР существенно отличаются от аналогичных критериев для задачи ОС. Показано, что количество измерений, необходимое для обеспечения наблюдаемости ЭР равно числу ветвей в рассматриваемой сети [3]. Поскольку в реальных сетях число узлов чаще всего меньше, чем число ветвей для обеспечения наблюдаемости ЭР требуется большее число измерений, чем при решении задачи ОС.

Анализ систем уравнений состояния позволяет сделать выводы о роли параметров схемы замещения для сравниваемых задач. Для задачи оценивания состояния важна точность определения параметров схемы замещения, что не всегда возможно. На величину параметров сопротивлений и проводимостей оказывает влияние значительное количество различных факторов: температура, влажность, ветер и т. д. Роль параметров схемы замещения в задаче энергораспределения вторична, поскольку данные значения используются только в части определения потерь электроэнергии в элементах схемы замещения сети. Величина потерь электрической энергии в нормальных режимах работы значительно меньше (составляет около 1–4 %) передаваемой электрической энергии.

Общей чертой сравниваемых задач является применение метода наименьших квадратов при расчете решения. Данный подход широко применяется для целого ряда задач, включая определение статистических характеристик нагрузок [5].

В табл. 1 приведено сопоставление традиционной для энергетики задачи ОС и задачи энергораспределения (ЭР), которая позволяет определить расчетные оценки потоков электроэнергии в сети.

Сравнение задачи энергораспределения и традиционной для энергетики задачи оценивания состояния показывает их отличие практически по всем основным критериям. Методы теории оценивания состояния имеют высокую степень научной проработки и являются перспективными для применения их к измерениям электрической энергии, однако, требуют адаптации и доработки.

Таблица 1

Сравнение традиционной для энергетики задачи ОС и задачи ЭР

Параметр сравнения	Традиционная задача ОС	Задача ЭР
Уравнения состояния	Классические уравнения установившегося режима, основанные на I и II законах Кирхгофа и законе Ома, например (1)	Уравнения балансов ЭЭ в узлах и ветвях сети, дополненные уравнениями расчета технических потерь ЭЭ на элементах схемы замещения; (2)
Вектор состояния	Комплексные значения узловых напряжения	Потоки электроэнергии в условных началах ветвей
Источник измерений	Система диспетчерского управления, АСДУ	Системы учета ЭЭ, АСКУЭ
Тип измерений	Действующие значения активной и реактивной мощностей, модули напряжений и токов	Потоки активной и реактивной ЭЭ
Расчетный интервал времени	Мгновенный срез времени	Соответствует интервалу измерений (минута, час, сутки)
Чувствительность к топологическим и режимным изменениям	Чувствительны	Нечувствительны
Минимально необходимое количество измерений для наблюдаемости	Удвоенное число узлов на графе сети минус один	Удвоенное число ветвей на графе сети

1. Оценивание состояния в электроэнергетике / А.З. Гамм, Л.Н. Герасимов, И.И. Голуб и др. М.: Наука, 1983. 302 с.

2. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. М., 1990. 220 с.

3. Кочнева Е.С., Паздерин А.В., Самойленко В.О. Использование методических подходов теории оценивания состояния для расчета и достоверизации потоков электрической энергии в сетях // Электричество. 2014. № 10. С. 12–21.
4. Паздерин А.В. Проблема моделирования распределения потоков электрической энергии в сети // Электричество. 2004. № 10. С. 2–8.
5. Хрущев Ю.В., Панкратов А.В., Бацева Н.Л., Полищук В.И., Тавлинцев А.С. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента // Изв. Томск. политех. ун-та. 2014. Т. 325. № 4. С. 164–175.

ВЫЧИСЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ОЦЕНОК С БОЛЕЕ НИЗКОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ ПО СРАВНЕНИЮ С ИЗМЕРЕНИЯМИ

Е.С. Кочнева, А.В. Паздерин

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В статье рассматривается вычисление расчетного аналога измерения, погрешность расчета которого ниже предельно допустимой погрешности измерения комплекса учета.

The article deals with the computation of the calculated measurement analog. The accuracy of the calculated value is lower than the maximum permissible error of energy metering complex.

Развитие современных автоматизированных систем учета имеет тенденцию в сторону расширения территориального охвата и увеличения количества измерительных комплексов. На высоком и сверхвысоком напряжении практически каждая автоматизированная система учета электроэнергии имеет избыточный состав измерений. Из традиционной для энергетики теории оценивания состояния [1] известно, что избыточный состав измерений позволяет оценивать достоверность поступающих измерений, вычислять их расчетные оценки, оценивать статистические составляющие погрешности и пр. Методы и подходы теории оценивания состояния имеют высокую степень научной проработки и зарекомендовали себя применимо к данным систем телеметрии. В задачах оценивания состояния в качестве переменных используются модули и углы токов и напряжений, а также величины активных и реактивных мощностей. Задача энергораспределения (ЭР), разработанная для расчета величин потоков и потерь электроэнергии в элементах электрической сети, использует методические подходы теории оценивания состояния [2, 3].

Уравнения состояния задачи ЭР включают в себя уравнения балансов энергии в узлах и ветвях сети:

$$\sum_{j \in \omega_i} W_{ij} + W_i = 0, i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

$$W_{ij} + W_{ji} - \Delta W_{ij} = 0, ij = 1, 2, \dots, M, \quad (2)$$

где W_i – узловая инъекция ЭЭ узла i ; W_{ij} – поток ЭЭ по всем связям узла i ; ω_i – множество узлов, инцидентных узлу i , N – число узлов в схеме сети.

Уравнения (1) и (2) должны быть дополнены уравнениями расчета технических потерь на элементах схемы.

По аналогии с подходами ОС из системы (1) и (2) могут быть сформированы контрольные уравнения (КУ) [4]. Для этого из системы исключаются все неизмеренные переменные. Невязки КУ будут отличными от нуля, если в измерениях, входящих в уравнения, содержатся погрешности.

Избыточность измерений – необходимое условия для составления системы КУ. Отсутствие хотя бы одного избыточного измерения приведет к отсутствию КУ.

При наличии погрешностей в измерениях ЭЭ невязки (небалансы) КУ отличны от нуля. Грубые ошибки приводят к появлению больших невязок (небалансов), превышающих допустимые. Допустимую невязку d_k k -ого КУ следует определять исходя из предельно допустимой относительной погрешности $\delta_{\mathcal{E}_j}$ каждого измерения $W_i^{\text{изм}}$ входящего в данное КУ

$$d_k = \sqrt{\sum_{i \in \omega_k} \delta_{\mathcal{E}_i}^2 (W_i^{\text{изм}})^2}. \quad (3)$$

Система контрольных уравнений может быть получена двумя методами. Первый метод основан на топологических свойствах системы уравнений состояния и называется по аналогии топологическим. Второй метод, алгебраический, является более формализованным. Здесь процедура получения системы КУ основана на исключении алгебраическим способом всех неизмеренных переменных из системы уравнений состояния, которая определяется уравнениями баланса ЭЭ в узлах и в ветвях схемы сети (1), (2).

Подробнее задача энергораспределения, условия наблюдаемости энергораспределения, метод контрольных уравнений, формирование системы контрольных уравнений, процесс вычисления фактических и допустимых невязок описаны в [4].

Наличие избыточных измерений позволяет также оценить, насколько расчетные оценки потоков электроэнергии точнее измерений. На первом этапе необходимо рассчитать относительную точность расчета δ_{W_i} потока \mathcal{E}_i , вычисленного с использованием контрольного уравнения (3). Для каждого контрольного уравнения относительную точность расчета $\delta_{\mathcal{E}_i}$ можно рассчитать с помощью выражения:

$$\delta_{\mathcal{E}_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^n a_j^2 \cdot \delta_{W_j}^2}, \quad (4)$$

где a_j – коэффициент в контрольном уравнении номер i перед измерением Ξ_i .

Необходимо упомянуть, что точность расчетной оценки измерения i зависит от количества измерений n , входящих в соответствующее КУ. Расчетная оценка тем точнее, чем меньше количество измерений в КУ. В качестве «резервных» измерений, используемых в случае признания имеющихся недостоверными, следует использовать контрольные уравнения, число n для которых мало. Самые «короткие» контрольные уравнения (число n в (4) мало) будут сформированы с использованием дублирующих измерений, либо показаний тех измерительных комплексов, которые находятся недалеко от исследуемой точки измерения. «Короткие» контрольные уравнения наиболее эффективны для задачи оценки достоверности измерений.

На участке сети, изображенном на рис. 1 обозначены уровни измерения потока W_1 .

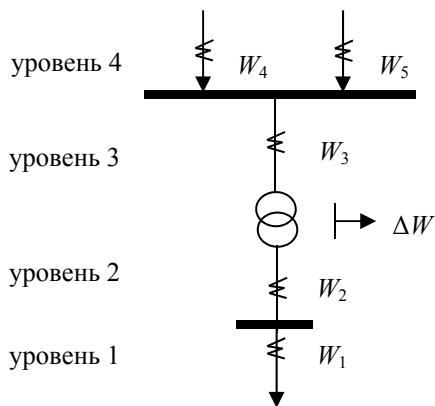


Рис. 1. Уровни измерений

Технические потери ЭЭ на трансформаторе, обозначенные $\Delta\Xi$, считаются рассчитанными заранее и известными.

На первом шаге для рассматриваемого фрагмента сети должна быть сформирована система уравнений состояния энергораспределения, количество уравнений равно трем. В ней метки получают только измеренные переменные. Для получения системы контрольных, необходимо исключить из системы уравнений состояния все неизмеренные переменные. В данном случае в схеме имеется полный охват присоединений измерениями. То есть система контрольных уравнений в точности соответствует системе уравнений состояния энергораспределения.

На основе системы КУ могут быть сформированы группы проверочных выражения для наиболее ответственных измерений. То есть это измерение может быть рассчитано через линейную комбинацию других измерений. В изображенной на рисунке 1 схеме для потока W_1 , благодаря наличию измерений W_2 , W_3 , W_4 и W_5 , могут быть составлены следующие КУ:

$$\begin{aligned} W_1 &= W_2, \\ W_1 &= W_3 - \Delta W, \\ W_1 &= W_4 + W_5 - \Delta W. \end{aligned} \quad (5)$$

В данном случае измерение W_1 может быть получено с использованием измерений трех уровней, т. е. оно резервируется на трех уровнях. В рассматриваемом фрагменте сети можно рассчитать коэффициент локальной избыточности, связанный с количеством измерений. Число ветвей равно 1, количество измерений 4. Измерения 4 и 5 считаются как одно, поскольку измеряют прием электроэнергии на шины и рассматриваться отдельно в данном случае не могут. Согласно [3], для обеспечения наблюдаемости требуется число измерений равное числу ветвей, все остальные будут являться избыточными. Коэффициент локальной избыточности $\kappa_{\text{изб}}$ больше числа избыточных измерений на единицу, то есть равен 4. В случае, если избыточных измерений нет, коэффициент локальной избыточности равен 1.

Как известно, все измерения содержат ошибки. Наличие измерительной погрешности обуславливает разницу в результатах выражений (5). Допустим, относительная точность всех измерительных комплексов $W_2 - W_5$, изображенных на рисунке 1, одинакова и равна 1,6 %, тогда для уровней 1 и 2 относительная точность будет составлять также 1,6 %. Пуская погрешность расчета потерь составляет 10 %, поскольку в нормальных режимах величина потерь ЭЭ относительно перетока ЭЭ по элементу составляет 1 %, относительная точность расчета потерь будет равна 0,01 %. Тогда относительная точность уровня 3 составит $\sqrt{1,6^2 + 0,01^2} \approx 1,603$ %, а для уровня 4 – $\sqrt{1,6^2 + 1,6^2 + 0,1^2} \approx 2,265$ %. Минимизируя взвешенную сумму квадратов относительных ошибок измерений, можно получить самую точную оценку измерения потока ЭЭ:

$$F = \sum_{k=1}^{\kappa_{\text{изб}}} \frac{1}{\left(\delta_k \cdot W_k^{\text{изм}}\right)^2} \left(W_k^{\text{изм}} - W^{\text{рас}}\right)^2 \rightarrow \min. \quad (6)$$

Количество слагаемых, входящих в функцию (6), равно коэффициенту локальной избыточности (2,8), который, в свою очередь, равен количеству уровней измерения рассматриваемого потока ЭЭ. Величины δ_k рассчитываются по выражению (4). Величина первого множителя

$1/(\delta_k \cdot W_k)^2$ в функции (6) выражает относительную точность измерения потока ЭЭ. Допустим, что все резервные (избыточные) измерения $\varepsilon_k^{\text{изм}}$ примерно одинаковы, в этом случае минимизируемая функция (16) может быть приведена к одному знаменателю:

$$F = \frac{\sum_{k=1}^{\kappa_{\text{изб}}} \left(\prod_{k=2}^{\kappa_{\text{изб}}} \delta_k^2 \right)}{\prod_{k=1}^{\kappa_{\text{изб}}} \delta_k^2} \cdot \left(\frac{W^{\text{рас}}}{W^{\text{изм}}} \right)^2 + C. \quad (7)$$

Вычислить оценку относительной погрешности величины расчетного потока ЭЭ, найденного с помощью резервных измерений, можно следующим образом:

$$\delta_{\text{рас}} = \sqrt{\prod_{k=1}^{\kappa_{\text{изб}}} \delta_k^2} / \sqrt{\sum_{k=1}^{\kappa_{\text{изб}}} \prod_{k=2}^{\kappa_{\text{изб}}} \delta_k^2} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Подобные подходы и математический аппарат может применяться не только при решении задачи оценки достоверности и вычислении расчетных оценок измерений электроэнергии, но также и при идентификации статических характеристик нагрузок на основании данных многократных измерений [5].

Относительная погрешность расчета потока ε_1 с использованием остальных избыточных измерений, в рассматриваемом выше примере, будет равна:

$$\delta_{\varepsilon_1} = \sqrt{\frac{(1,6^2 \cdot 1,6^2 \cdot 1,603^2 \cdot 2,265^2)}{((1,6 \cdot 1,603 \cdot 2,265)^2 + (1,6 \cdot 1,603 \cdot 2,265)^2 + (1,6 \cdot 1,6 \cdot 2,265)^2 + (1,6 \cdot 1,6 \cdot 1,603)^2)}} \approx 0,856\%.$$

Учитывая принятую относительную погрешность ИКЭЭ W_1 равной 1,6%, значение относительной погрешности расчета меньше погрешности измерения практически в два раза.

В случае, если погрешность расчета потерь во внимание не принимается, относительная точность расчета составит

$$\delta_{\varepsilon_1} = \sqrt{\frac{(1,6^2 \cdot 1,6^2 \cdot 1,6^2 \cdot 2,263^2)}{((1,6 \cdot 1,6 \cdot 2,263)^2 + (1,6 \cdot 1,6 \cdot 2,263)^2 + (1,6 \cdot 1,6 \cdot 2,263)^2 + (1,6 \cdot 1,6 \cdot 1,6)^2)}} \approx 0,855\%.$$

На практике погрешность расчета потерь может быть 20 % и выше, однако даже такая неопределенность в значении потерь практически не сказывается на точности расчетной оценки. Относительная точность расчета в данном примере при погрешности расчета потерь 20 % составляет 0,858 %, а при погрешности расчета потерь 50–0,869 %. Этот факт связан с тем, что величина потерь относительно перетоков по эле-

ментам в рабочих режимах мала и на расчетах практически не сказывается.

В данном примере наличие четырех уровней измерения одного потока электроэнергии позволило снизить погрешность расчетного значения относительно самого измерения почти в два раза.

Современные автоматизированные системы учета являются надежным источником информации о потоках электроэнергии, однако выход из строя любой их компоненты может привести к появлению данных с грубыми ошибками. Математическая обработка данных позволяет решить целый ряд задач: производить оценку достоверности данных, а также получать расчетные оценки измерений. Применение задачи энергораспределения и методов, разработанных в рамках теории оценивания состояния дает хорошие результаты. Избыточный состав измерений позволяет получить расчетные оценки, обладающие меньшей погрешностью по сравнению с самими измерениями.

1. Оценивание состояния в электроэнергетике / А.З. Гамм, Л.Н. Герасимов, И.И. Голуб и др. М., 1983. 302 с.

2. РД 34.09.101–94. Типовая инструкция по учету электроэнергии при ее производстве, передаче и распределении. М., 1995.

3. Кочнева Е.С., Паздерин А.В., Самойленко В.О. Использование методических подходов теории оценивания состояния для расчета и достоверизации потоков электрической энергии в сетях // Электричество. 2014. № 10. С. 12–21.

4. Достоверизация измерений электроэнергии расчетными методами / А.О. Егоров, Е.С. Кочнева, А.В. Паздерин // Разработки молодых специалистов в области электроэнергетики : сб. 2008. № 1. С. 146–148.

5. Хрущев Ю.В., Панкратов А.В., Бацева Н.Л., Полищук В.И., Тавлинцев А.С. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента // Изв. Томск. политех. ун-та. 2014. Т. 325. № 4. С. 164–175.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ И ЦИФРОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков

Ивановский государственный энергетический университет,
Иваново

Данная работа посвящена исследованию влияния электромагнитного поля на чувствительные элементы и решению задач электромагнитной совместимости оптических и цифровых трансформаторов тока и напряжения.

This paper investigates the effect of electromagnetic fields on the sensitive elements and objectives of electromagnetic compatibility of optical and digital current and voltage transformers.

Введение

Применение микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, устройств измерения и определения качества электроэнергии способствует внедрению и развитию цифровых цепей, идущих от первичных преобразователей тока и напряжения (ТТ и ТН). Использование оптических каналов для цифровых цепей решает задачу отстройки от электромагнитных наводок и выноса потенциала. Создание оптических и цифровых трансформаторов тока и напряжения с оцифровкой сигнала сразу на высоком потенциале измерительного трансформатора [1, 2] лучшим образом решает указанную задачу. Однако возникает проблема обеспечения электромагнитной совместимости чувствительных элементов и микроэлектронной аппаратуры, находящихся в непосредственной близости от токоведущих частей. Обеспечение указанных условий связано с теоретическими исследованиями на основе изучения электромагнитного поля и выбором наиболее оптимального места расположения электроники и разработкой системы экранирования.

Исследование электромагнитной совместимости оптических трансформаторов напряжения

В последнее время широко рекламируются оптические трансформаторы тока и напряжения. В оптических трансформаторах напряжения чувствительные элементы – оптические кристаллы, расположенные в теле изоляционной колонны (рис. 1), реагируют на электрическое поле, вращая плоскость поляризации света, что измеряется с помощью оптических

чувствительных элементов. Электрическое поле в теле изолятора трансформатора и самих кристаллах определяется напряжением, подключенным к трансформатору, а также зависит от ряда факторов, таких как наличие в непосредственной близости высоковольтных токоведущих частей и заземленных элементов металлических конструкций электротехнического оборудования. Все эти элементы искажают электрическое поле не только вокруг, но и в теле изолятора самого трансформатора.

Для оценки влияния высоковольтных проводников были выполнены аналитические расчеты по определению электрического поля в месте расположения оптических преобразователей напряжения. Для выполнения этих расчетов были приняты следующие допущения: диэлектрическая проницаемость опорной конструкции изолятора трансформатора равна единице, источниками электрического поля являются бесконечные проводники, расположенные в верхней части трансформатора (рис. 1), что позволяет считать поле плоскопараллельным.

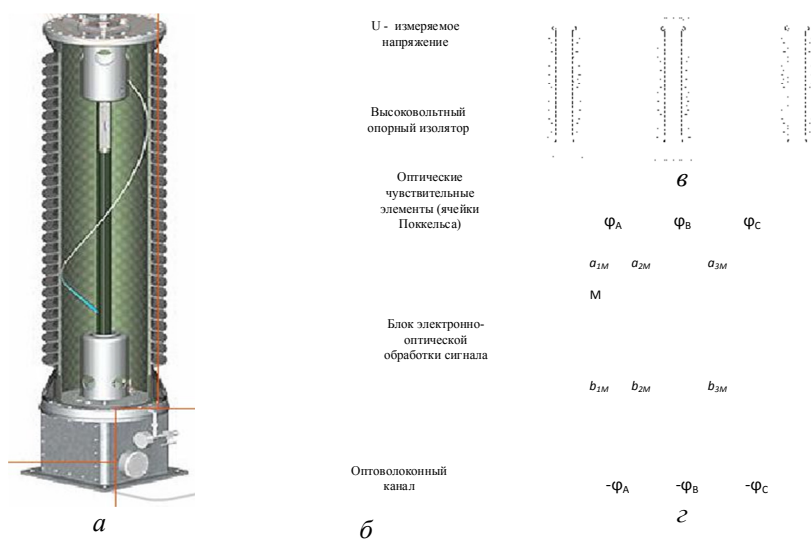


Рис. 1. Оптический трансформатор напряжения:

a – трехмерная модель; b – структура; v – расположение на ОРУ;
 z – схема для расчета электрического поля чувствительных элементов

С учетом принятых допущений значения напряженностей электрического поля вдоль оси максимальной чувствительности датчика в месте расположения оптических преобразователей можно определить с помощью метода зеркальных изображений, а также на основании по-

студента Максвелла с условием принятия диэлектрической проницаемости земли равной бесконечности, по следующим формулам:

$$E_y^M = \sum_{i=1}^n E_y^{iM}, \quad (1)$$

где i – номер проводника, n – количество проводников; E_y^{iM} – напряженность электрического поля, создаваемая i -м проводником в точке M и определяемая по формулам:

$$\begin{aligned} E_y^{1M} &= |\vec{E}^{1M}|; \quad E_y^{2M} = |\vec{E}^{2M}| \cdot \frac{a_{1M}}{a_{2M}}; \quad E_y^{3M} = |\vec{E}^{3M}| \cdot \frac{a_{1M}}{a_{3M}}; \\ E_y^{4M} &= |\vec{E}^{4M}|; \quad E_y^{5M} = |\vec{E}^{5M}| \cdot \frac{b_{1M}}{b_{2M}}; \quad E_y^{6M} = |\vec{E}^{6M}| \cdot \frac{b_{1M}}{b_{3M}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Модуль напряженности электрического поля проводника бесконечной длины определяется по формуле:

$$|\vec{E}_i| = \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r_{iM}}, \quad (3)$$

где τ_i – заряд проводника, Кл; r – расстояние от i -го проводника до точки M , м; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Заряды проводников могут быть определены из второй группы уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \tau_1 = \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \beta_{13}\varphi_3; \\ \tau_2 = \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \beta_{23}\varphi_3; \\ \tau_3 = \beta_{31}\varphi_1 + \beta_{32}\varphi_2 + \beta_{33}\varphi_3, \end{cases} \quad (4)$$

где β_{11} - β_{33} – емкостные коэффициенты, связанные с потенциальными коэффициентами α_{11} - α_{33} первой группы Максвелла как:

$$[\alpha] = [\beta]^{-1}. \quad (5)$$

Для определения потенциальных коэффициентов используются формулы, полученные на основе метода зеркальных изображений (рис. 1, 2):

$$\alpha_{km} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{b_{km}}{a_{km}}, \quad \alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{2 \cdot h}{r}, \quad (6)$$

где h – расстояние от проводника до поверхности земли, м; r – радиус проводника, м.

Анализ влияния токопроводящих элементов осуществлялся для типового расположения оборудования на ОРУ подстанции. Исследования показывают, что наибольшее влияние на чувствительные элементы самого трансформатора будут оказывать токопроводы ошиновки, находящиеся под высоким напряжением как собственной фазы, на которой измеряется напряжение, так и соседних фаз.

Расчеты, выполненные по приведенным выше аналитическим формулам, показывают, что уровень наводок от соседних фаз достаточно высок и может достигать 10 % от величины полезного сигнала.

Для выполнения более детальных исследований были разработаны двухмерные и трехмерные математические модели, основанные на решении дифференциальных уравнений методом конечных элементов с использованием программных пакетов MATLAB и COMSOL Multiphysics.

Расчетная картина электрического поля для расположения трех трансформаторов напряжения представлена на рис. 2.

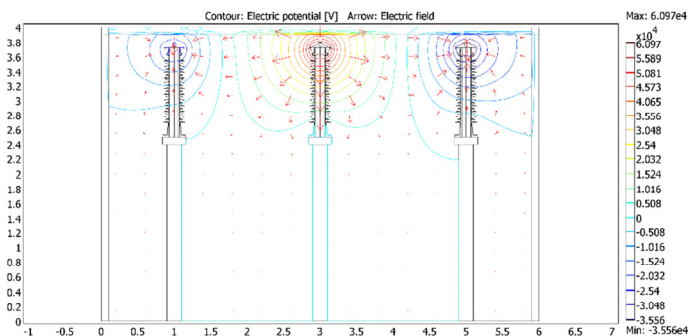


Рис. 2. Распределение электрического потенциала (контуры) и электрическое поле (стрелки)

В результате расчетов определены значения величин электрического поля в чувствительных элементах измерительного трансформатора, обусловленных как приложенным напряжением, так и напряжениями соседних фаз. Исследования, проведенные на разработанных математи-

ческих моделях, подтвердили ранее полученные результаты по аналитическим формулам.

В таблице 1 приведены результаты исследования зависимости погрешности оптических трансформаторов напряжения от количества и расположения ячеек Поккельса, возникающая за счет наводок от соседних фаз.

Таблица 1

**Зависимость погрешности оптических трансформаторов
напряжения от количества и расположения ячеек Поккельса**

№	Количество ячеек	Расположение ячеек*	Амплитудная погрешность, %	Фазовая по- грешность, град.
1	1	Верх 1	5,929	3,134
2		Верх 2	2,596	1,586
3		Центр	3,392	2,046
4		Низ 2	3,841	2,257
5		Низ 1	4,106	2,377
6	2	Верх 1, Центр	4,487	2,420
7		Верх 1, Низ 1	5,713	3,031
8		Центр, Низ 1	3,469	2,082
9		Верх 2, Центр	2,827	1,718
10		Верх 2, Низ 2	2,879	1,736
11		Центр, Низ 2	3,580	2,134
12	3	Верх 1, Центр, Низ 1	4,330	2,342
13		Верх 2, Центр, Низ 2	3,002	1,810
14	5	Верх 1, Верх 2, Центр, Низ 2, Низ 1	1,986	1,110

*Верх 1 подразумевает высоту расположения ячейки 1,113 м от уровня опоры; Верх 2 – 0,863 м; Центр – 0,613 м; Низ 2 – 0,363 м; Низ 1 – 0,113 м

Снижение влияния наводок на точность измерений можно осуществить за счет:

- использования металлических экранов с достаточными изоляционными промежутками;
- применения материалов с высокой диэлектрической проницаемостью;
- алгоритмической обработки сигналов с учетом напряжения на соседних фазах.

Все указанные решения не могут в полной мере исключить описанные недостатки, так как трудно реализуемы технически.

Следует отметить, что в классических электромагнитных и емкостных трансформаторах данной проблемы не существует, так как электрическое поле формируется делителем напряжения сформированным отдельными каскадами трансформаторов в электромагнитных трансформаторах, либо каскадами из конденсаторов в емкостных трансформаторах.

В авторской разработке цифровых трансформаторов напряжения используются маломощные делители напряжения, обладающих собственной проводимостью, достаточной для обеспечения заданного класса точности с учетом влияния наводок электромагнитного поля.

Исследование электромагнитной совместимости цифровых трансформаторов тока и напряжения

Цифровые измерительные трансформаторы тока (ЦТТ) и комбинированные цифровые трансформаторы тока и напряжения (ЦТТН) содержат электронные блоки на первичной стороне, т. е. под потенциалом первичного провода в зоне интенсивных электромагнитных полей.

В цифровых трансформаторах предусматривается расположение микропроцессорной аппаратуры с АЦП внутри токопроводящего экрана используемого непосредственно в качестве токопровода (рис. 3, а).

Располагать электронику внутри цилиндрического токопровода, как показывают исследования, наиболее эффективно. В соответствии с законом полного тока и исходя из осевой симметрии магнитное поле внутри бесконечно длинного цилиндрического проводника с током отсутствует. Численный расчет электромагнитного поля реальной конструкции (рис. 3, б) также подтверждает минимальное значение поля внутри токопровода.

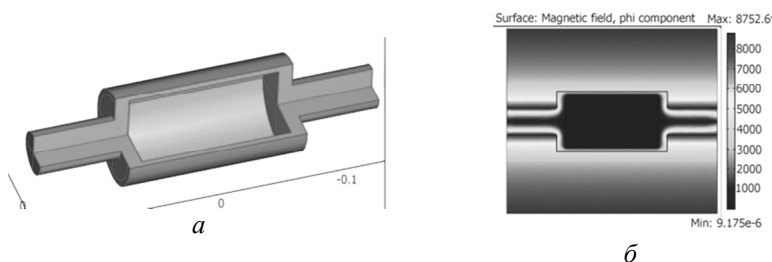


Рис. 3. Геометрия токопровода с полостью для размещения микроэлектроники (а) и расчет напряженности [А/м] магнитного поля при первичном токе 1000 А (б)

Для предварительной оценки электромагнитного воздействия поле можно разложить на две компоненты: продольную и поперечную.

Рассмотрим цилиндрический провод в продольном магнитном поле. Здесь внешнее магнитное поле \vec{H}_0 наводит в проводнике ЭДС электромагнитной индукции, которая определяется из уравнения:

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7)$$

Для синусоидально изменяющегося магнитного поля уравнение может быть записано так:

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = - \frac{j\omega \dot{H}_l R}{2}, \quad (8)$$

Поле внутри H_l определяется внешним полем H_0 с учетом компенсационного эффекта – поля образованного током по окружности цилиндра, плотность которого определяется по уравнению: $\dot{\delta} = \dot{E} \cdot \gamma$, где γ – электропроводность материала. Несложно показать, что чем выше электропроводность, тем выше коэффициент экранирования, так как электропроводность материала величина конечная, то и абсолютного исключения поля внутри трубы добиться не удастся. Кроме того, экранирующий эффект зависит от частоты и полностью отсутствует при неизменном во времени магнитном поле (табл. 2).

Магнитная проницаемость цилиндра оказывает существенное влияние на формирование картины магнитного поля, однако магнитное поле внутри трубы по величине как правило не снижается.

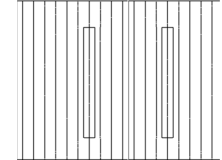
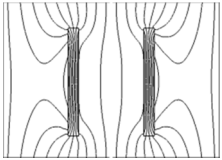
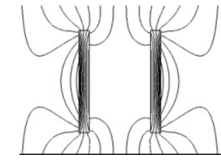
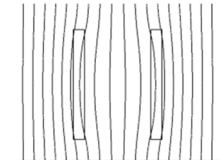
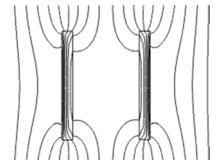
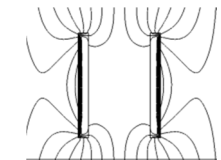
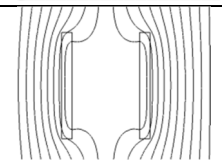
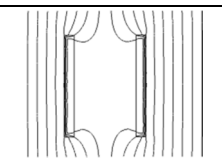
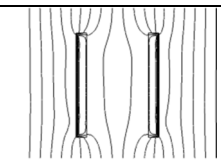
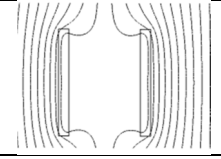
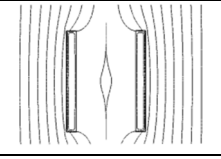
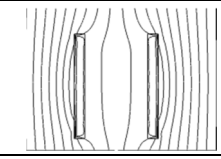
Поперечное магнитное поле также ослабляется внутри цилиндрического проводника (рис. 4). При низкочастотном электромагнитном воздействии существенную роль играет магнитная составляющая поля. В данном случае на экранирующий эффект существенным образом влияет магнитная проницаемость материала μ (в отличие от экранирующего эффекта в продольном магнитном поле).

Для цилиндрического экрана с внутренним радиусом трубы r_1 , внешним r_2 и относительной магнитной проницаемостью металла экрана μ коэффициент экранирования однородного поля с напряженностью H_0 определяется по формуле

$$k_s = \frac{H_0}{H_i} = 1 + \frac{(\mu - 1)}{4\mu} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right). \quad (9)$$

Таблица 2

**Картины силовых линий магнитного поля
при продольном внешнем поле**

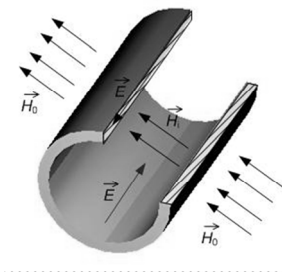
Частота	Относительная магнитная проницаемость		
	$\mu = 1$	$\mu = 10$	$\mu = 100$
$f = 0$ Гц			
$f = 10$ Гц			
$f = 50$ Гц			
$f = 100$ Гц			

На высоких частотах преобладает электромагнитное экранирование. Наведенная электрическая компонента поля вдоль проводника (рис. 4) приводит к возникновению токов, которые в свою очередь создают компенсирующее магнитное поле внутри цилиндра (табл. 3).

Представленное выше разложение на собственное поле проводящей трубы, а также внешние однородные продольное и поперечное поля позволяет оценить экранирующий эффект. Однако для исследования влияния поля токопроводящих частей цифровых трансформаторов необходимо полноценное трехмерное полевое моделирование с учетом полной геометрии токопроводящих элементов. Для этого была создана полевая модель, геометрия которой представлена на рис. 5 а, позволяющая изучить распределение магнитного поля как внутри так и вне измерительной и преобразующих частей цифрового трансформатора тока.

Таблица 3

**Картины силовых линий магнитного поля
при поперечном внешнем поле**



**Рис. 5. Цилиндрический
экран в поперечном
магнитном поле**

Частота Гц	Относительная магнитная проницаемость		
	$\mu = 1$	$\mu = 10$	$\mu = 100$
0			
10			
50			
100			

В основе моделирования использованы уравнения записанные в пространственно-частотной области:

$$\begin{aligned}
 &-\nabla \left((j\omega\gamma) \vec{A} + (\gamma) \nabla U \right) = 0 \\
 &(j\omega\gamma) \vec{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \vec{A}) + (\gamma) \nabla U = 0
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Для решения уравнения (10) должны быть дополнены необходимыми граничными условиями. Решение указанной задачи было выполнено с помощью программной среды COMSOL Multiphysics, в которой полученные трехмерные картины полей (рис. 5, б) позволяют точно определить уровни электромагнитных воздействий, выбрать материал и размеры дополнительных экранирующих элементов.

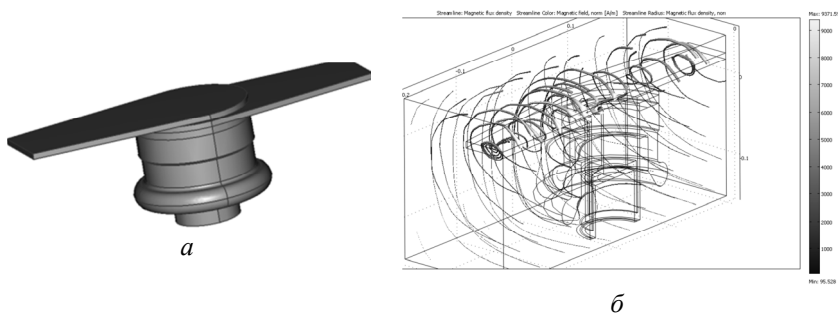


Рис. 6. Геометрия трехмерной модели токопроводящей части цифрового трансформатора (а) и картина магнитного поля (б)

Выводы

Результаты исследований показали значительный уровень наводок от соседних фаз и в связи с этим значительные погрешности оптических трансформаторов напряжения.

Проведенные исследования показали, что расположение микроэлектроники цифрового трансформатора внутри цилиндрического провода с током позволяет исключить основную компоненту электромагнитного поля, созданную собственным током. Кроме того, цилиндрический провод является экраном и для полей, наведенных токами соседних проводов. При этом экранирующий эффект может быть оценен на основе приближенных формул и более точно вычислен на основе компьютерного математического моделирования.

1. Гречухин В.Н., Лебедев В.Д., Лебедев Д.А., Наумов А.В., Тимофеев Е.Н., Баженов О.А., Трубачев С.Е., Глотов А.А. Создание нового класса высоковольтного энергетического оборудования цифровых трансформаторов тока для ОРУ 220 кВ (110–750 кВ) станций и подстанций энергосистем // Выставка научных достижений Ивановской области. III Ивановский инновационный салон «ИННОВАЦИИ 2006». С. 109.

2. Гречухин В.Н. Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем // Вестник ИГЭУ. 2006. № 4. С. 1–9.

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РОЗЫ ВЕТРОВ И КОМПОНОВКИ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ НА РАБОТУ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ ГТУ

А.М. Неволин, П.Н. Плотников

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Статья посвящена вопросу влияния направления ветра на работу аппаратов воздушного охлаждения масла ГТУ, работающих в условиях эксплуатации. Показан эффект от наиболее вероятного и наиболее неблагоприятного направления ветра в летних метеоусловиях севера Свердловской области. В качестве критерия оценки рассматривалась тепловая мощность маслоохладителей. В заключении обоснована необходимость учета розы ветров при проектировании компоновки станции с позиции оптимальных условий работы маслоохладителей и даны рекомендации по модернизации конструкции теплообменников.

The article is devoted to the wind influence on the operation of air oil coolers of gas-turbine unit. The effect of the most probable and most unfavorable wind directions for the summer conditions of north part of Sverdlovsk region is shown. The coolers heating capacity was considered as a criterion. In conclusion the authors point out the necessity of the wind rose consideration for plant layout design and suggest the variant of the oil cooler modernization.

Для охлаждения масла системы смазки газоперекачивающих агрегатов (ГПА) в газотранспортной отрасли широко используются аппараты воздушного охлаждения (АВОм). Данный тип маслоохладителей обеспечивает стабильную работу маслосистемы при существенных отрицательных температурах наружного воздуха и позволяет размещать газокompректорные станции (ГКС) вне зависимости от источников пресной воды, что особенно актуально в северных широтах – в местах расположения основных газовых месторождений.

Вместе с тем АВОм чрезвычайно чувствительны к изменению параметров окружающего воздуха при относительно высоких положительных температурах в летний период эксплуатации. Увеличение температуры воздуха на входе в АВОм значительно снижает теплосъем секции теплообменника. Увеличение температуры охлаждающего воздуха может быть вызвано непосредственным увеличением температуры окружающей среды или забросом горячего воздуха с выхода из воздушного тракта маслоохладителя на его вход. Данное явление наблюдается

вследствие возникновения застойных и рециркулирующих вихревых зон воздушных потоков на площадке компрессорной станции, образующихся при обтекании потоками атмосферного воздуха зданий и сооружений КС [1]. Местоположение и размер подобных зон зависит от направления и скорости ветра, а также компоновки и размеров зданий и сооружений на цеховой площадке станции.

Расстояние между зданием цеха и технологическими установками, к которым относится и АВОМ, не нормируется и принимается из условий монтажа, удобства ремонта и обслуживания оборудования [2]. Как правило, в целях сокращения территории и протяженности коммуникаций здания и сооружения КС располагаются достаточно компактно. Наряду с этим роза ветров учитывается при проектировании ГКСв основном с точки зрения безопасности жизнедеятельности: производственные площадки станции ориентированы таким образом, чтобы преобладающие ветра были направлены от компрессорного цеха и, соответственно, от служебных помещений в сторону газовой обвязки или вдоль линии цехов. Этим обеспечивается унос выброса перекачиваемого природного газа, осуществляемого при пуске и останове ГПА в сторону от вероятного скопления людей [3]. При этом расположение АВОМ в компоновке станции с точки зрения оптимальных условий теплообмена практически не учитывается. Вместе с тем, имея сравнительно небольшие габариты, маслоохладители, расположенные обыкновенно вблизи здания цеха при негативном стечении обстоятельств вполне могут оказаться под влиянием воздушных потоков, рециркулирующих вблизи стен последнего.

Учет влияния розы ветров на работу аппаратов воздушного охлаждения весьма сложен [4], но, по нашему мнению, он необходим для анализа работы аппаратов в летний период эксплуатации.

Экспериментальные исследования подобных явлений в силу своей технической сложности и стохастичности поведения воздушных масс не могут быть реализованы в условиях эксплуатации и потому проводятся в лабораторных условиях методом продувок масштабных моделей в аэродинамической трубе или посредством численного моделирования.

В данной работе показаны результаты численного исследования влияния розы ветров и связанной с ней рециркуляции теплого воздуха на площадке КС на работу АВОМ. В качестве объекта исследования был выбран АВОМ венгерского производства с типом теплообменной секции 06-10 (рис. 1). Данный теплообменник массово используется для охлаждения масла-смазки ГПА на базе ГТУ ГТН-16 и ГТН-25.

В аппарате данной конструкции охлаждающий воздух подводится с боков аппарата через систему жалюзи 3, прокачивается двумя вентиля-

торами 1 через горизонтально расположенную теплообменную секцию 2 и выбрасывается вверх.

Исследование проведено для пяти секционного АВОм в реальном окружении зданий и сооружений Краснотурьинского линейного производственного управления магистральных газопроводов. Маслоохладитель размещен между двумя соседними зданиями цехов на высоте 1,5 м над землей (рисунок 2).

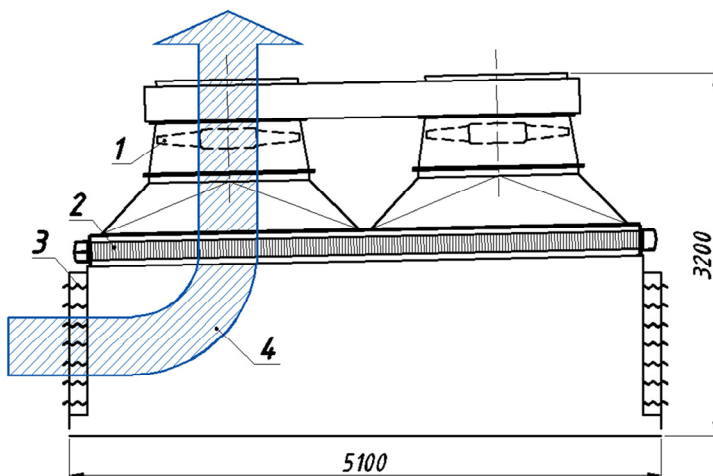


Рис. 1. Секция АВОм: 1 – крыльчатка вентилятора; 2 – трубный пучок; 3 – жалюзи; 4 – направление движения воздушного потока

Расчетное исследование было проведено методом конечных элементов в программном комплексе STAR-CCM+. Кроме маслоохладителя полноразмерная модель включила в себя наиболее крупные объекты, способствующие образованию вихрей воздушных потоков близи АВОм: здания цехов, комплексные воздухоочистительные устройства ГТУ и дымовую трубу с переходным патрубком. Служебные помещения, в частности здание щита управления, расположенные перед линией цехов, в силу удаленности от маслоохладителей в модели учтены не были (рис. 2, 3).

Неструктурированная сетка модели, построенная на базе многогранных ячеек, состояла из 3,8 млн конечных элементов. Особое внимание при построении сетки было уделено поверхностям АВОм и зоне предполагаемой рециркуляции воздуха.

В качестве начальных и граничных условий задавались температура и давление атмосферного воздуха, направление и скорость ветра, расход

и температура воздуха на поверхностях АВОм отвечающих за вход и выход.

Воздух рассматривался как идеальный газ,двигающийся в турбулентном режиме. Задача решалась в стационарной постановке.

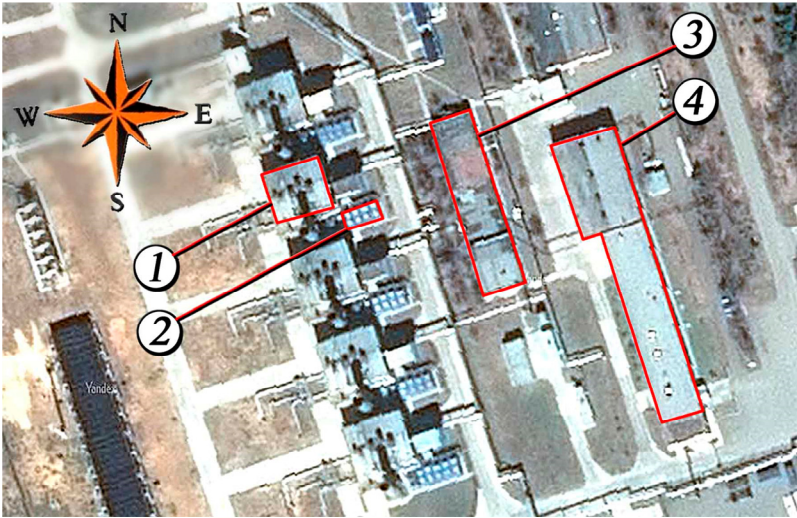


Рис. 2. План ГКС: 1 – здание цеха; 2 – АВОм; 3 – здание щита управления; 4 – административные здания

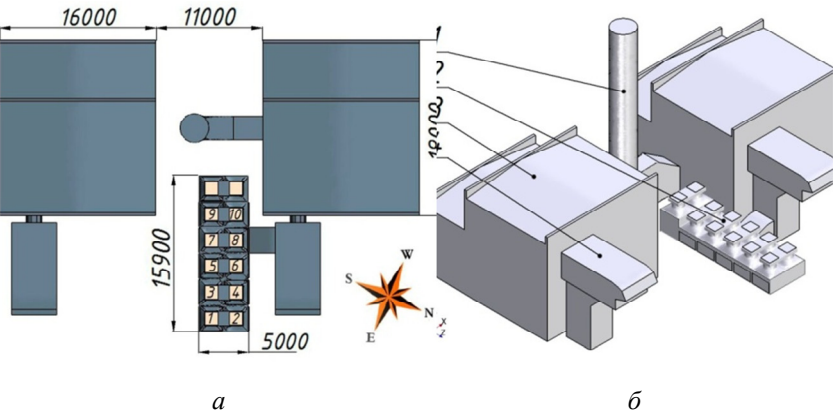


Рис. 3. Модель АВОм в окружении строений: *а* – вид сверху; *б* – в изометрии; 1 – дымовая труба; 2 – АВОм; 3 – здание цеха; 4 – КВОУ ГТУ

Для моделирования работы АВОм были выбраны условия июля месяца как наиболее тяжелого для маслоохладителей периода эксплуатации. В это время в рассматриваемом регионе в розе ветров преобладают северные, северо-восточные ветра со скоростью до 5 м/с и температурой до 30 °С в послеполуденные часы.

Температура выхода воздуха из теплообменника задавалась 42 °С, что соответствует температуре масла на входе 65 °С и температуре окружающего воздуха 30 °С при работе пятисекционного АВОм ГТН-16 со всеми работающими вентиляторами и открытыми жалюзи [5].

В качестве результата рассматривалась средняя температура воздуха на входе в секции теплообменника. Полученные данные использовались для расчета теплосъема секции согласно зависимости [5]:

$$Q = Q'(t_{M1} - t_{B1}),$$

где $Q' = 5,8$ кВт/°С – паспортный удельный теплосъем секции АВОм, t_{M1} , t_{B1} – температуры масла и воздуха на входе в теплообменник соответственно.

В ходе расчетов были получены следующие результаты:

Северо-восточный ветер (ориентация АВОм относительно сторон света показана на рис. 2) не оказывает влияния на работу АВОм: воздушный поток проходит поперек линии цехов (вдоль группы маслоохладителей) и уносит горячий воздух, выходящий из теплообменника, за дымовую трубу в сторону газовой обвязки без образования вихря.

Северный ветер приводит к формированию небольшого диагонального по отношению к АВОм вихря, подмешивающего горячий воздух, выходящий из первых секций (1-4 вентилятор, см. нумерацию на рис. 3а), в поток, засасываемый в последующие три секции с подветренной стороны (рис. 4а). Средняя температура охлаждающего воздуха при этом увеличивается на 3 °С, снижение теплосъема АВОм в целом достигает 2,5–2,8%. Наветренная сторона теплообменника подмесу горячего воздуха на вход не подвержена.

Для сравнения было проведено моделирование для западного направления ветра при тех же значениях скорости и температуры воздуха. Данное направление ветра начинает преобладать в розе ветров рассматриваемого региона в августе месяце, при более низких температурах воздуха, но изредка наблюдается и в июле. Опасность западного ветра заключается в том, что при обтекании воздушным потоком здания цеха, за последним образуется устойчивая масштабная зона рециркуляции, охватывающая АВОм практически полностью (рис. 4б).

Результаты моделирования показали, что в той или иной степени подмешиванию горячего воздуха на вход АВОм подвергаются все секции теплообменника. При этом теплосъем маслоохладителя снижается на 5,1–5,5%.

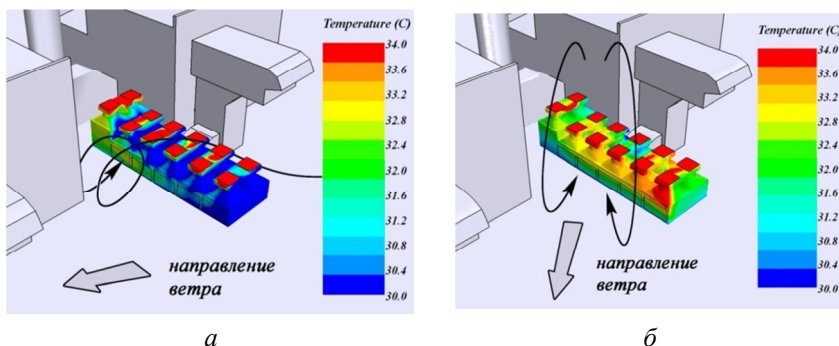


Рис. 4. Распределение температур на входных поверхностях АВОм:
 а – подветренная сторона АВОм при северном ветре;
 б – подветренная сторона АВОм при западном ветре

Анализ полученных результатов показал возможные пути решения обозначенной проблемы применительно к рассматриваемой компоновке ГКС. Свести к минимуму или устранить заброс горячего воздуха на вход в АВОм, возможно за счет: а) изменения расположения группы теплообменников относительно зданий цеха; б) внесения изменений в существующую конструкцию АВОм.

В первом случае результаты вариантных расчетов показали, что наиболее оптимальным решением с учетом минимального снижения теплосъема является выдвижение АВОм вперед относительно здания цеха на 5,3 м, что соответствует ширине двух секций маслоохладителя. При данном расположении теплосъем снижается на 1,1–1,4 % при северном направлении ветра и на 3,2–3,6 % – при западном. Дальнейшее отдаление АВОм от здания позволяет еще больше минимизировать вероятность подмеса горячего воздуха, но вместе с тем ощутимо снижает компактность расположения оборудования и увеличивает протяженность масляных коммуникаций.

В компоновке существующей газоперекачивающей станции (ГКС) изменить месторасположения столь крупногабаритного оборудования как АВОм не представляется возможным. Поэтому данные рекомендации приводятся для случая проектирования новой ГКС.

Во втором случае было решено установить на выхлопные тракты вентиляторов АВОм трубы, позволяющие отдалить друг от друга вход и выходящего воздуха.

В модельном исследовании рассматривались варианты труб высотой 3, 5 и 7 м (уровень крыши цехового здания).

В результате проведенных расчетов было установлено, что для полного исключения подмеса отработавшего теплого воздуха при преобладающем в июле северном ветре достаточно установить на выходные отверстия воздушного тракта выхлопные трубы высотой три метра (рис. 5а). При этом поток теплого воздуха относится ветром в сторону, не затягиваясь в небольшой вихрь, образующийся в районе входов под 7 и 9 вентиляторами.

Минимизировать влияние подмеса при западном и северо-западном ветрах, дующих из-за здания цеха и способствующих образованию крупномасштабной рециркулирующей области, охватывающей АВОм целиком, возможно только при установке труб высотой до 7 м. В этом случае поток теплого воздуха выдувается выше уровня крыши цеха и относится ветром в сторону, почти не оказывая влияния на забор воздуха в теплообменник. При этом при западном направлении ветра небольшая часть горячего воздуха, подмешиваемая на вход АВОм в районе 1 и 3 вентилятора, вызывает снижение его теплосъема не более чем на 1 % (рис. 5б).

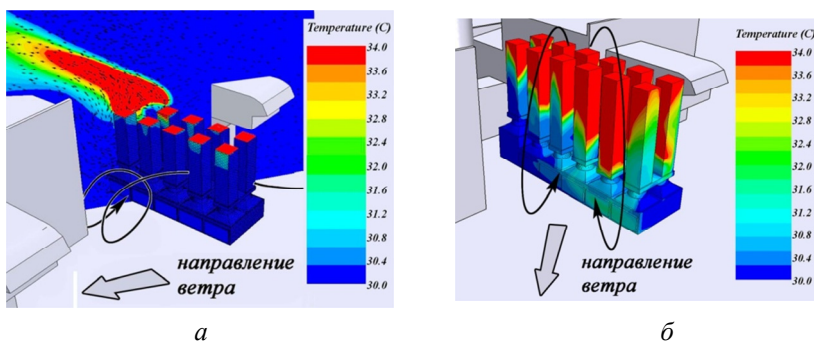


Рис. 5. Распределение температур на входных поверхностях АВОм:
а – подветренная сторона АВОм при северном ветре (высота труб 3 м);
б – подветренная сторона АВОм при западном ветре (высота труб 7 м)

Таким образом, рассмотренная модернизация конструкции АВОм посредством удлинения его выходного воздушного тракта за счет установки выхлопных труб позволяет свести к минимуму вероятность сни-

жения эффективности АВОм за счет подмеса на его вход горячего отработавшего воздуха. Данный вариант модернизации отличается простотой исполнения, низкой себестоимостью, не приводит к изменению существующей компоновки оборудования и может быть выполнен силами персонала станции.

Выводы

При наиболее вероятном направлении ветра в самый тяжелый для эксплуатации маслоохладителей период реальное расположение АВОм относительно зданий и сооружений рассматриваемой ГКС обеспечивает минимальное снижение теплосъема, вызываемого забросом горячего воздуха на вход теплообменника.

Сильный западный ветер при высокой температуре окружающей среды приводит к интенсивному подмесу горячего воздуха на вход всех секций АВОм, снижая теплосъем маслоохладителя на 5 % и более. Снижение теплосъема может достичь куда более существенных значений у трехсекционных АВОм, какими укомплектованы подобные ГПА на других КС региона. Выявленный эффект может стать причиной недостаточной глубины охлаждения масла и, как следствие, причиной аварийного останова ГПА.

Удлинение выходного воздушного тракта АВОм является простым и эффективным решением повышения надежности работы маслоохладителя за счет сведения к минимуму вероятности подсоса отработавшего рециркулирующего горячего воздуха на вход теплообменника. Кроме того, предложенное решение может быть использовано для создания дополнительной тяги при работе маслоохладителей на режиме естественной конвекции (при отключенных вентиляторах) в зимний период эксплуатации.

При проектировании генеральных планов новых ГКС важно учитывать розу ветров не только с точки зрения безопасности жизнедеятельности, но и со стороны создания оптимальных условий для работы маслоохладителей ГТУ. Особенно это актуально для центральных районов РФ с относительно высокими температурами окружающей среды в летний период эксплуатации.

1. Габдрахманов А.А. Повышение эффективности эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах : дис. Уфа, 2007, 217 с.

2. ВНТП 3-85 Нормы технологического проектирования объектов сбора, транспорта, подготовки нефти, газа и воды нефтяных месторождений. 1986.

3. Шаммазов А.М. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций : учебник для вузов / А.М. Шаммазов, В.Н. Александров, А.И. Гольянов и др. М., 2003, С. 170.

4. Ванчин А.Г. Оценка работы аппаратов воздушного охлаждения газа при разных вариантах включения вентиляторов // Газовая промышленность. 2014. № 7. С. 84–87.

5. Техническое описание и инструкция по монтажу, эксплуатации и уходу за группой маслоохладителей зимнего исполнения типа 06-10. Будапешт, 1979.

УСТРАНЕНИЕ ПРИЧИН ШУМООБРАЗОВАНИЯ В АВТОНОМНЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

А.С. Плотников, Т.С. Жилина

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет,
Тюмень

В статье представлены результаты замеров уровня шума в эквивалентном уровне звука автономных теплоэнергетических установок, для фиксации и выявления передачи повышенного уровня звука через строительные внутридомовые конструкции жилых зданий с последующим составлением рекомендаций по устранению причин шумообразования.

The article presents the results of noise-level measurement in the Equivalent Sound Level accepted for the autonomous thermal power plants to determine the fact of a sound level excess transmission incoming through the building in-house envelopes of residential units in order to draw up specific recommendations how to exclude a cause of noise emission

В настоящее время автономные котельные, работающие на конкретных объектах ЖКХ, являются хорошим инженерным решением. Их использование позволяет исключить потери теплоносителя, сократить эксплуатационные издержки и повысить качество обслуживания потребителей.

Снабжение теплом потребителей при помощи автономных котельных сейчас является приоритетным, потому что именно в сфере теплоснабжения сложилась наихудшая ситуация с инвестированием и с темпами старения оборудования. У теплоснабжения социальная значимостькратно выше, чем у электроэнергии: на тепло приходится более 50 % в структуре платежей граждан за коммунальные услуги.

На объектах реконструкции и нового строительства в ЖКХ Западной Сибири чаще всего применяются автономные газовые котельные мощностью 0,5–2,5 МВт. В большинстве случаев они крышные, иногда пристроенные или встроенные, выполненные как в виде блочных компоновок, так и полностью смонтированные в стационарных зданиях и помещениях.

Объекты обследования – два жилых 19 этажных здания с помещениями соцкультбыта. Объекты расположены в г. Тюмени по адресу: проезд Солнечный, и имеют размеры 28х30 м [5].

Каждое из зданий состоит из двух функциональных частей:

- помещения, предназначенные для постоянного проживания населения;
- помещения соцкультбыта, предназначенные для обслуживания потребностей проживающего населения.

На кровле жилой части каждого из зданий размещена крышная котельная суммарной мощностью по 1,0 МВт. Блок котельной одноэтажный, прямоугольный в плане. Высота здания – ~55 м. Высота этажей – 2,8 м.

Год окончания строительства – 2014. Год ввода в эксплуатацию – 2014.



Рис. 1. Объекты исследования

На данных объектах были произведены замеры шума в эквивалентном уровне звука в помещении одноэтажной крышной котельной, на кровле, техническом этаже и в помещениях квартир, располагающихся непосредственно под блоком крышной котельной для анализа существующих звуковых нагрузок, с последующим составлением диаграммы распространения звука через внутридомовые ограждающие конструкции [1].

Замеры шума производились в эквивалентном уровне звука $L_{\text{Аэкв}}$, дБА [2]. Шумомер – марки «Testo», модель «816».

Перед началом инструментального обследования был проведен визуальный осмотр помещения котельной и инженерных коммуникаций здания, а также замеры уровней шума окружающей застройки. Зафиксированный уровень шума находится на уровне $L_{\text{Аэкв}} = 42$ дБА.

В ходе осмотра был отмечен слышимый спектр звука и ощутимая вибрация в помещении крышной котельной, технического чердаке и

двух низлежащих этажах. Также были зафиксированы ошибки при монтаже трубопроводов и оборудования котельных [3].

В состав оборудования котельных входят:

- котлы – 2 шт., марка REX (ICI Caldaie REX 50-130) 50;
- газовые горелки марки CIB Unigas P61 – 2 шт.;
- насосы марки Wilo с мокрым ротором;

Диаметр главного стояка системы отопления $d = 159 \times 4,5$ мм.

Зафиксированные ошибки монтажа трубопроводов и оборудования:

- проход главного стояка системы отопления через строительные конструкции выполнен без устройства гильзы и предоставления «степени свободы» трубопроводу, подверженному термической деформации;
- отсутствие шумопоглощающих кожухов на горелочных устройствах;
- скрытые недочеты при монтаже блока котельных;
- отсутствие расчета шумоизоляции в составе «корыта» котельной;

Результаты инструментального обследования представлены в табл. 1 [4].

Таблица 1

Результаты замеров шума

Точка измерения	Минимальный показатель эквивалентного уровня звука $L_{A_{эв}}$, дБА	Максимальный показатель эквивалентного уровня звука $L_{A_{эв}}$, дБА	Средний показатель эквивалентного уровня звука $L_{A_{эв}}$, дБА	Нормативный показатель уровня звука $L_{A_{эв}}$, дБА [5]
В помещении котельной	76,1	92,7	84,4	–
На кровле	54,9	60,2	57,55	–
На техническом этаже	42,2	56,0	49,1	–
В лифтовых холлах	47,2	51,1	49,15	–
В квартирах на 18-м и 19-м этажах	34,9	47,0	40,95	30 (с 23.00 – 07.00 ч) 40 (07.00– 23.00 ч)

По результатам замеров слышимых спектров звука для управляющей компании были составлены следующие рекомендации:

- установка шумопоглощающих кожухов на горелочные устройства;
- предоставление степени свободы трубопроводам с температурными деформациями;
- выполнение расчета по вычислению необходимой толщины шумоизолирующего слоя;

В результате на исследуемых объектах выполнено:

- установка шумопоглощающих кожухов на горелочные устройства;
- устройство гильзы для прохода трубопровода в строительных конструкциях.

После выполнения указанных выше мероприятий были выполнены повторные замеры (таблица 2).

Таблица 2

Результаты замеров шума

Точка измерения	Минимальный показатель эквивалентного уровня звука $L_{A_{эвб}}$, дБА	Максимальный показатель эквивалентного уровня звука $L_{A_{эвб}}$, дБА	Средний показатель эквивалентного уровня звука $L_{A_{эвб}}$, дБА	Нормативный показатель уровня звука $L_{A_{эвб}}$, дБА [1]
В помещении котельной	56,1	72,7	64,4	–
На кровле	44,9	50,2	47,55	–
На техническом этаже	38,2	46,0	42,1	–
В лифтовых холлах	37,2	41,1	39,15	–
В квартирах на 18 и 19 этажах	28,9	37,0	32,95	30 (с 23.00 – 07.00 ч) 40 (07.00– 23.00 ч)

Для наглядного анализа распространения уровня звука, исходящего от автономного источника теплоснабжения до и после составления рекомендаций была построена диаграмма распространения шума с выбранными позициями для измерения и уровнем звуковой нагрузки.



a



б

Диаграмма 1
Распространение шума: *a* – до; *б* – после

Представленные повторные замеры с учетом погрешности измерения прибора соответствуют нормативным требованиям [5].

-
1. Куклев Ю.И. Физическая экология : учеб. пособие. 2-е изд., испр. М., 2003. 357 С.
 2. Плотников А.С., Жилина Т.С. Исследование процессов шумообразования в системах отопления жилых зданий : сб. материалов XIII Науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и соискателей. ТюмГАСУ, 29 ноября 2013 г. С. 165–168.
 3. Борьба с шумом / под ред. докт. тех. наук проф. Е.Я. Юдина. М., 1964.
 4. Плотников А.С., Жилина Т.С. Слышимые спектры звука крышных котельных установок жилых зданий : сб. материалов XIV Науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и соискателей. ТюмГАСУ, 14 ноября 2014 г. С. 130–134.
 5. СНиП 23-03-2003 «Защита от шума».

АНАЛИЗ КПД АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ РАБОТЕ С ДЕФЕКТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ

Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Рассмотрены вопросы влияния технического состояния подшипников на коэффициент полезного действия асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Приведены результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные работы проводились при испытаниях асинхронного двигателя в номинальном режиме с исправным подшипником и с двумя неисправными подшипниками, имеющих дефекты во внутренней и внешней частях обоям. Дефекты подшипников увеличивают потери энергии, что приводит к повышенному рассеиванию тепла в зоне контактов его элементов, перегреву и снижению КПД двигателя. Проведено тепловое обследование двигателя, представлены графические данные, характеризующие изменение температур узлов и КПД машины при работе с неисправным подшипником.

The article deals with issues of influence of bearings' technical condition on the induction efficiency motors with squirrel-cage rotor. The results of experimental research are presented. The experimental work has been carried out using the tests of the induction motor at rated nominal mode, healthy bearing and with two defective ones, which had defects of inner and outer parts of cages. The bearings defects increase the energy losses, which leads to increased heat dissipation in contact parts of its elements, overheating and reducing of motor efficiency. The thermal observation of motor are performed, graphic dates are presented, which describe the changes in temperature units and efficiency of machine with working with faulty bearing.

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором являются наиболее массовой продукцией электромашиностроения, на их долю приходится свыше половины мирового энергопотребления. Обеспечение надежности функционирования АД в промышленности является важнейшим условием их эффективной эксплуатации. Достижение этих требований в значительной мере зависит от качества работы подшипников, а именно, от их характеристик определяющих, тепловые, вибрационные, шумовые и другие эффекты, возникающие в зоне контакта механических элементов [1].

Дефекты подшипников могут обуславливать ряд явлений во вращающихся машинах: колебания, нагрев, изменение частоты вращения, повышенный шум и т. д. Можно отметить, что в этих случаях увеличиваются местные перегревы, возрастают механические потери, что в конечном счете обуславливает снижение КПД АД. Таким образом, оценка влияния неисправности подшипников на КПД АД является актуальной задачей.

Авторы работы [2] отмечают, что эксплуатация АД номинальной мощностью 2,2 кВт и $2p = 2$, с неисправным подшипником обуславливает снижение КПД на 1,5 %. В работе [3] отмечается, что в подобных случаях возможно снижение КПД АД номинальной мощностью 0,75 кВт и $2p = 2$, в пределах 1,6–2,4 %. Авторы работы [4] отмечают, что неисправности подшипников в насосных установках в котором используются АД с номинальной мощностью 650 кВт и номинальной скоростью вращения 1485 об/мин могут обуславливать повышение энергопотребления до 14 %. При этом КПД всей системы насосной установки может снижаться до 18 %. После проведенного обзора можно отметить, что вопрос исследования влияния неисправностей подшипников на КПД АД рассматривался в недостаточном объеме. В отмеченных публикациях не приводятся исследования влияния неисправности подшипника на КПД в зависимости от времени работы машины. Для рассмотрения этих вопросов, были проведены испытания АД при работе с различными подшипниками и проанализированы полученные данные.

Экспериментальная часть. При испытаниях АД питался непосредственно от трехфазной сети, испытания проводились на стенде, в котором тормозящий момент создавался индукционным динамометром. В процессе экспериментов выполнялись тепловизионные снимки с помощью тепловизора Testo 875-2i. Запись значений токов и напряжений, выполнялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (USB3000) с частотой дискретизации 50 кГц и измерительной платы с тремя датчиками токов LEMHX 02-P и тремя датчиками напряжений LV25-PSP5. Скорость вращения испытуемого АД регистрировалась с помощью фототахометра «Mastech DT-2234A». Момент на валу АД задавался равным номинальному $M_H = 2,5$ Н·м. Мгновенные значения токов и напряжений оцифровывались АЦП и записывались на компьютер для обработки в пакете Matlab. Испытания АД, проведенные поочередно с каждым подшипником, представляли собой ряд стадий, с длительностью 2; 15; 30; 60; 120 мин. По окончании каждой стадии выполнялось снятие термограмм, регистрация мгновенных значений токов и напряжений. При этом испытания АД с каждым подшипником проводились после охлаждения машины до исходной температуры окружающей среды. В качестве испытуемой машины был использован АД с номинальной мощностью 0,75 кВт и номинальной скоростью вращения

2820 об/мин, в котором используются подшипники марки 6204 (рис. 1). Испытания АД проводились с исправным подшипником; с подшипником, имеющим отверстие по внешней обойме 4 мм (неисправный № 1); с подшипником, имеющим отверстие по внешней обойме 6 мм (неисправный № 2). В двух последних случаях также имелись небольшие выемки во внутренних обоймах. Применяемые способы искусственного получения дефекта для исследования режимов работы АД с поврежденными подшипниками описаны [5].



Рис. 1. Подшипники (слева-направо): *а* – исправный, неисправные № 2 и 1; *б* – неисправные № 2 и 1 вид сбоку

Тепловизионное обследование позволяет визуально оценивать механические дефекты и распределение температуры АД непосредственно в процессе эксплуатации. Наличие участка с избыточной температурой свидетельствует о развитии дефекта.

Результаты экспериментов. В качестве примера (рис. 2, 3), приведены термограммы АД после 15 мин работы. Максимальная температура при тепловом соответствует внутренней обойме подшипников. Подшипники закрыты щитами и с внешней стороны расположены уплотнения, т. е. армированные манжеты. Как правило, резиновые манжеты с пружиной предназначены для уплотнения валов, защиты от попадания пыли и грязи могут, они эксплуатироваться при температурах от -60°C до 170°C . Соответственно, на приведенных термограммах максимальная температура соответствует уплотнению АД (манжет с пружиной).

Испытуемая машина с определенным подшипником эксплуатировалась непрерывно. С увеличением периода эксплуатации с неисправным подшипником происходит возрастание тепловых потерь в зоне подшипникового узла, что обуславливает рост температуры и снижение КПД. Номинальная рабочая температура используемых подшипников 6204 составляет от -20 до 120°C . Далее приведены термограммы (рис. 4, 5), полученные при итоговых испытаниях АД длительностью 120 мин, с экспериментальными подшипниками.



Рис. 2. Термограмма работы АД с исправным подшипником
(время испытаний 15 мин)

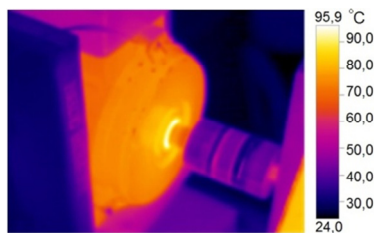


Рис. 3. Термограмма работы АД с неисправным подшипником № 1
(время испытаний 15 мин)

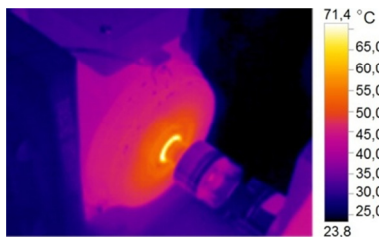


Рис. 4. Термограмма работы АД с исправным подшипником
(время испытаний 120 мин)

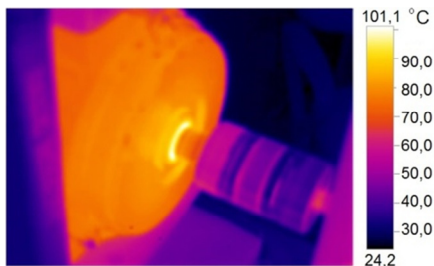


Рис. 5. Термограмма работы с неисправным подшипником № 1
(время испытаний 120 мин)

Тепловизионное обследование, при котором измеряются температура и область с повышенной температурой, позволяет оценить мощность выделений в дефекте [6]. Исходя из полученных данных (таблицы 1–3), видно, что разница между температурой на корпусе машины с температурой окружающей среды (т. е. относительное отклонение температуры) становится значительно выше при работе АД с механическими дефектами. Происходит повышенное рассеивание тепла.

Таблица 1

Температурные значения (при работе 30 мин)

АД с исправным подшипником		Относительное отклонение температуры, $T_{frame, temp} - T_{amb, temp}, ^\circ\text{C}$
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ\text{C}$	24,8	14,2
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ\text{C}$	39	
АД с неисправным подшипником № 1		45,6
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ\text{C}$	24,9	
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ\text{C}$	70,5	
АД с неисправным подшипником № 2		46,7
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ\text{C}$	24,8	
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ\text{C}$	71,5	

Таблица 2

Температурные значения (при работе 60 мин)

АД с исправным подшипником		Относительное отклонение температуры, $T_{frame, temp} - T_{amb, temp}, ^\circ\text{C}$
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ\text{C}$	24,5	18,7
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ\text{C}$	43,2	
АД с неисправным подшипником № 1		51,8
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ\text{C}$	24,4	
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ\text{C}$	76,2	
АД с неисправным подшипником № 2		52
Температура окружающей среды, $T_{amb, temp}, ^\circ\text{C}$	24,5	
Температура на корпусе машины, $T_{frame, temp}, ^\circ\text{C}$	76,5	

Таблица 3

Температурные значения (при работе 120 мин)

АД с исправным подшипником		Относительное отклонение температуры, $T_{frame\ temp} - T_{amb\ temp}$, °C
Температура окружающей среды, $T_{amb\ temp}$, °C	23,8	19,7
Температура на корпусе машины, $T_{frame\ temp}$, °C	43,5	
АД с неисправным подшипником № 1		53,8
Температура окружающей среды, $T_{amb\ temp}$, °C	24,2	
Температура на корпусе машины, $T_{frame\ temp}$, °C	78,0	
АД с неисправным подшипником № 2		54,5
Температура окружающей среды, $T_{amb\ temp}$, °C	24,0	
Температура на корпусе машины, $T_{frame\ temp}$, °C	78,5	

В проведенных экспериментах не проводились точные измерения уровня электрических сопротивлений на каждом этапе испытаний, поэтому оценивать измерение температуры обмотки методом сопротивлений неприемлемо. Выделяемая мощность дефекта, может рассматриваться как диссипационное потребление энергии. Поэтому часть подводимой мощности будет расходоваться для активации дефекта, вследствие чего возникают нагревы, вибрации [6]. По полученным экспериментальным данным (рис. 6), заметно что дефект подшипников обуславливает непрерывный рост температуры корпуса АД, которые являются наибольшим в первые 30 минут работы машины.

После этого перейдем к данным (табл. 4–7), где приведены основные параметры АД в процессе испытаний. Исходя из проведенного обзора в начале работы, известно, что эксплуатация АД с неисправными подшипниками обуславливает снижение КПД. Данные замечания подтверждаются проведенными работами. Например, исходя из итоговых испытаний, длительностью 120 минут (табл. 9) можно заметить, что в данном случае снижение КПД машины находится в пределах 5,97–6,76 %.

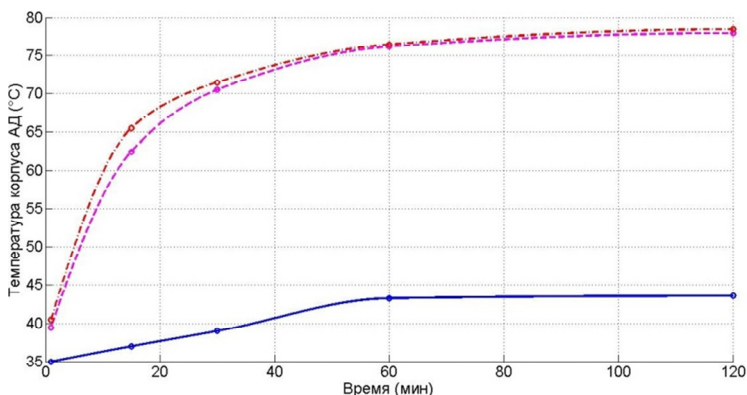


Рис. 6. Температура корпуса АД при номинальной нагрузке: АД с исправным, неисправным № 1 и неисправным № 2 подшипниками

Таблица 4

Результаты экспериментов время работы 2 мин

Подшипник	Исправный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Время работы, мин	2	2	2
Номинальный ток, А	1,96	1,997	1,995
Скорость вращения ротора, об/мин	2755	2754	2725
Входная мощность, Вт	1040,22	1086,54	1079,2
Выходная мощность, Вт	760,4	760,12	752,12
Коэффициент мощности	0,765	0,795	0,791
КПД, %	73,1	70	69,7

Таблица 5

Результаты экспериментов время работы 30 мин

Подшипник	Исправный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Время работы, мин	30	30	30
Номинальный ток, А	1,965	1,999	1,996
Скорость вращения ротора, об/мин	2755	2737	2712
Входная мощность, Вт	1053,11	1096,4	1100,78
Выходная мощность, Вт	760,4	755,43	748,53
Коэффициент мощности	0,772	0,802	0,8
КПД, %	72,2	68,9	68

Таблица 6

Результаты экспериментов время работы 60 мин

Подшипник	Исправный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Время работы, мин	60	60	60
Номинальный ток, А	1,971	2,012	2,0
Скорость вращения ротора, об/мин	2755	2724	2706
Входная мощность, Вт	1056,1	1105,91	1104,09
Выходная мощность, Вт	760,4	751,84	746,88
Коэффициент мощности	0,778	0,803	0,808
КПД, %	72	68	67,6

Таблица 7

Результаты экспериментов время работы 120 мин

Подшипник	Исправный	Неисправный № 1	Неисправный № 2
Время работы, мин	120	120	120
Номинальный ток, А	1,979	2,003	2,011
Скорость вращения ротора, об/мин	2755	2724	2706
Входная мощность, Вт	1057,57	1112,19	1110,41
Выходная мощность, Вт	760,4	751,84	746,88
Коэффициент мощности	0,778	0,81	0,808
КПД, %	71,9	67,6	67,3

Далее рассмотрим следующий график (рис. 7), характеризующий КПД АД, в периодах времени работы: 2; 30; 60; 120 мин. На приведенном графике отмечены значения КПД для каждого этапа испытаний. Можно отметить, что после работы машины в течение 120 мин КПД АД с исправным подшипником снизился на 1,64 % по сравнению с начальным значением (после 120 мин); КПД АД с неисправным подшипником № 1 снизился на 5,9 % по сравнению с начальным значением (после 120 мин); КПД АД с неисправным подшипником № 2 снизился на 6,4 % по сравнению с начальным значением (после 120 мин).

В приведенных работах [2–3] не исследуется изменение КПД машины с неисправным подшипником с учетом длительной работы машины, т. е. при прогревом состоянии АД, что является схожим при работе двигателя в реальных условиях при длительном режиме. Следовательно, в данной работе получены уточненные данные по изменению КПД с неисправным подшипником с учетом прогретого состояния машины.

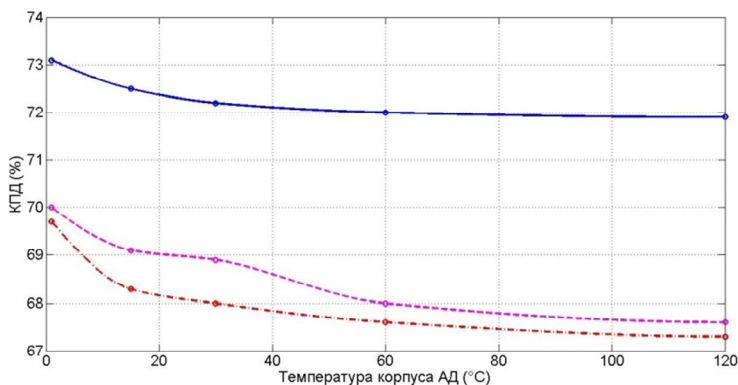


Рис. 7. КПД АД при номинальной нагрузке: АД с исправным, неисправным № 1 и неисправным № 2 подшипниками

При длительном режиме снижение КПД АД после 120 мин работ с неисправным подшипником находится в пределах 5,9–6,4 %. При длительном режиме работы АД, дефект в подшипнике усиливает момент сопротивления при вращении машины. Непосредственную статическую нагрузку в процессе работы АД получают только несколько тел качений подшипника, в то время как остальные прокатываются между обоймами. При этом, возникающие переменные нагрузки достигают своего максимума и минимума в верхних и нижних точках тела качения. Соответственно, дефекты в обоймах подшипников со временем обуславливают переменное изменение их внутреннего радиального зазора, что приводит к флуктуациям воздушного зазора машины, при этом котором искажается магнитное поле АД. Приведенные факторы обуславливают снижение КПД машины.

Выводы

В данной работе получены уточненные данные по изменению КПД АД с неисправным подшипником с учетом прогретого состояния машины. Выполненные работы являются приближенными к реальным условиям эксплуатации машин. Представлены термограммы, графики и табличные значения, характеризующие изменение температур узлов и КПД машины при работе с неисправным подшипником. В дальнейших работах планируется проведение испытаний АД, находящихся в длительной эксплуатации на реальных объектах и с подшипниками полученных износ в действительных условиях эксплуатации. При этом для оценки КПД предполагается проведение испытаний для разных типов АД по высоте оси вращения и числу пар полюсов машины.

-
1. Малафеев С.И., Копейкин А.И. Идентификация механических потерь в подшипниках электрических машин в режиме колебаний // Электротехника. 2006. № 4. С. 57–60.
 2. Frosini L., Bassi E., Gazzaniga C. Effect of the bearing faults on the efficiency of the induction motors // 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON), 2008. P. 1167–1172.
 3. Safin N., Prakht V., Dmitrievskii V. Bearing fault diagnostic of induction motor by stator currents analysis based on Park's vectors approach // Applied Mechanics and Materials, 2015. Vol. 698. P. 83–89.
 4. Mostafa A. Abu-Zeid, S.M. Abdel-Rahman. Bearing problems' effects on the dynamic performance of pumping stations // Alexandria Engineering J., 2013. Vol. 52. Is. 3. P. 241–248.
 5. Obaid R. R, Habetler T.G., Stack J.R. Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors // 4th IEEE International symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives, SDEMPED 2003, Proceedings. New Jersey. 2003. P. 182–187.
 6. Baranski M., Polak A. Thermographic diagnostic of electrical machines // 19th International Conference on Electrical Machines (ICEM): Proceedings. Rome, 2010. P. 1–3.
 6. Ярошенко И.В. Повышение эффективности функционирования высоковольтных мехатронных модулей на основе диагностики технического состояния : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05. Новочеркасск, 2014. 171 с.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РЕАКТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ВУЗОВСКОЙ ПОДГОТОВКЕ

В.К. Семенов, М.А. Вольман

Ивановский государственный энергетический,
Иваново

Выполнение существующей программы широкомасштабного развития ядерной энергетики России требует подготовки высококвалифицированных специалистов. Описан комплекс обучающих программ, внедрение которого способствует решению этой задачи. В рамках комплекса разработаны программы и методики симуляции нейтронно-физических экспериментов. Симуляция технологических процессов проводится на компьютерном и полномасштабном тренажерах энергетического блока АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Training of highly qualified specialists is needed for the existing program implementation of Russian nuclear power development. The system of training programs is described. Its introduction can solve this task. The programs and methodological support for the simulation of neutron-physical reactor measurements are designed. Simulation of the technological processes is carried out on the computer and full-scale simulator of WWER-1000.

Масштабы развития ядерной энергетики нашей страны очень велики: к 2030 году предусмотрено увеличение производства электроэнергии на атомных электростанциях более чем в 2 раза. Одним из условий успешной реализации этих планов является опережающая подготовка высококвалифицированных, способных к быстрой адаптации специалистов по эксплуатации энергоблоков АЭС. В настоящее время наблюдается дефицит подготовленного оперативного персонала блочных щитов управления – ведущих инженеров по управлению реактором (ВИУР) и ведущих инженеров по управлению турбиной (ВИУТ). Высокий уровень подготовки обслуживающих ядерные объекты специалистов является в свою очередь важным фактором, гарантирующим их безопасную и надежную эксплуатацию. Эффективная работа высших учебных заведений должна быть ориентирована на решение обозначенных проблем.

Нами предлагается единый обучающий комплекс, направленный на интенсификацию вузовской подготовки будущих ВИУРов. Объектом выступают водо-водяные энергетические реакторы как наиболее распространенные в мире. В основе комплекса лежит компетентностный подход, подразумевающий, что в качестве результата образования рассматривается не сумма усвоенной информации, а компетенции выпуск-

ника, характеризующие его способность применять знания и умения для успешной профессиональной деятельности за счет глубокого понимания физики изучаемых процессов. Достигается это за счет объединения единой концептуальной основой применения компьютерного и имитационного моделирования.

Комплекс состоит из нескольких частей. Первая из них содержит компьютерный лабораторный практикум по кинетике водо-водяных реакторов, основанный на численных экспериментах [1]. Каждая входящая в состав практикума работа содержит теоретический раздел, а также практическую часть – программы по компьютерному моделированию соответствующего процесса, реализованные в среде Mathcad. Разработанные математические модели охватывают кинетику холодного и горячего реактора. Они позволяют проанализировать роль запаздывающих нейтронов, влияние температурных обратных связей, температуры топлива и теплоносителя, величины вводимой реактивности, а также времени и способа ее ввода на характер различных переходных процессов, процессы выгорания топлива, отравления реактора ксеноном и самарием, а также ксеноновые колебания.

Вторая часть комплекса посвящена симуляции нейтронно-физических реакторных измерений.

В рамках третьей его части разработано методическое обеспечение симуляции операций пуска-останова блока на компьютерном и полномасштабном тренажерах блока АЭС с ВВЭР-1000. Целью внедрения является отработка обучаемыми навыков по управлению технологическими процессами. Реализация данной части комплекса позволяет как закрепить освоенные в рамках описываемого комплекса знания, так и систематизировать полученные в рамках других дисциплин теоретические знания об элементах энергоблока.

Подробнее рассмотрим вторую часть комплекса. В настоящее время в учебно-тренировочных центрах отечественных станций нашей страны создан сложный современный парк программно-технических средств обучения, наиболее сложными компонентами которого являются полномасштабные, аналитические и многофункциональные тренажеры для всех типов энергоблоков, эксплуатируемых в России. Постепенно тренажерные комплексы внедряются и в вузовскую подготовку. Причем применение их в вузе кардинально отличается от тренажерной подготовки на предприятиях с точки зрения навыков, достижение которых является целью их использования. Персоналом в ходе подготовки на должность или поддержания квалификации отрабатывается ведение технологического процесса конкретного блока, а результатом становится выработка алгоритмов действий в моделируемых тренажерами режимах эксплуатации. Для выпускника же основополагающей является

готовность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов, к управлению сложными технологическими объектами в целом.

В существующих вузовских программах и соответствующих учебниках реакторные измерения затрагиваются довольно поверхностно. Однако безопасный пуск и последующая эксплуатация ядерного реактора возможны только при знании его нейтронно-физических характеристик с точностью, удовлетворяющей требованиям правил ядерной безопасности и теплотехнической надежности активной зоны. Знакомство с техникой физического эксперимента и овладение ей со студенческой скамьи является одной из важнейших задач при подготовке специалистов, эксплуатирующих ядерные реакторы.

В основу разработанного комплекса симуляции реакторных физических экспериментов положены существующие руководящие документы (РД) [2, 3], адаптированные нами для имитаторов, в качестве которых используются функционально-аналитический тренажер (ФАТ) и полномасштабный тренажер (ПМТ) энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320). В основе тренажерных комплексов лежит математическое моделирование нейтронно-физических, тепломеханических, теплофизических и других процессов и, как следствие, построение модели функционирования энергоблока в различных режимах в реальном времени. ФАТ реализован на персональном компьютере в программной среде 3KeyMaster™ [4], программный продукт ООО «Вестерн Сервисез». Широкие возможности ФАТ позволяют проводить эксперименты над активной зоной, моделировать различного рода штатные и аварийные ситуации, а мобильность и удобство при работе на персональном компьютере дают возможность эффективно использовать ФАТ в учебном процессе. ПМТ имеет идентичное программное обеспечение в дополнении к полномасштабной модели реального блочного щита управления. Он обеспечивает моделирование в реальном масштабе времени всех режимов эксплуатации АЭС и также позволяет симулировать физические эксперименты. Адаптация методик проведения экспериментов проводилась с учетом особенностей используемых тренажерных комплексов, а также специфики учебного процесса.

В практикум включены следующие эксперименты:

- моделирование работы реактиметра на ФАТ;
- определение температурного, барометрического и плотностного коэффициентов реактивности на минимально контролируемом уровне мощности реактора, на энергетических уровнях мощности реактора;
- определение дифференциальных и интегральных эффективностей групп органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) и

коэффициента реактивности по концентрации борной кислоты в реакторе на минимально контролируемом уровне мощности;

- определение эффективности аварийной защиты реактора и эффективности наиболее эффективного ОР СУЗ;

- определение мощностного коэффициента и мощностного эффекта реактивности при увеличении мощности реактора от минимально контролируемого уровня до одного процента номинальной величины.

Каждая лабораторная работа по реакторным измерениям включает теоретический раздел; экспериментальную часть, содержащую адаптированные к компьютерным имитаторам существующие методики нейтронно-физических измерений на действующих установках; практическую часть, представляющую собой программы и методики обработки результатов экспериментов.

Найденные экспериментально характеристики (коэффициенты и эффекты реактивности, дифференциальные и интегральные характеристики поглотителей и пр.) далее используются в численных экспериментах при математическом моделировании различных переходных процессов, ход которых сравнивается с результатами экспериментов на имитаторе энергоблока.

Кроме того, стоит заметить, что тренажерная подготовка является очень мощным инструментом по формированию профессиональных компетенций будущего специалиста.

Таким образом, разработаны и внедрены методика и программы по симуляции нейтронно-физических реакторных измерений с использованием аналитического и полномасштабного тренажеров энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Они рассматриваются как часть единого обучающего комплекса, направленного на интенсификацию вузовской подготовки будущих ВИУРов и позволяющего сократить сроки их адаптации на рабочих местах.

1. Свидетельство № 2014618789. Программный комплекс симуляции переходных процессов в ядерных реакторах : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / В.К. Семенов, М.А. Вольман ; Иванов. гос. энерг. ун-т. № 2014616344 ; заявл. 02.07.2014 ; зарегестр. 28.08.2014.

2. РД ЭО 0150-2004. Типовые программы и методики проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. М.: Росэнергоатом, 2005. 273 с.

3. РД ЭО 0151-2004. Методики расчета нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках

атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. М.: Росэнергоатом, 2005. 101 с.

4. Western Services Corporation [Официальный сайт]. URL: <http://www.ws-corp.com>.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ КОМПЛЕКСНОГО УЗЛА НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ АВТОМАТИКИ

А.С. Тавлинцев

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Идентификация математической модели нагрузки является сложной и трудоемкой задачей, требующей работы достаточно квалифицированного эксперта. Увеличения степени автоматизации процесса выявления информации о реакции нагрузки на изменения условий электроснабжения позволит ускорить и упростить ход решения поставленной задачи. В данной работе рассмотрен процесс автоматизированной идентификации математической модели нагрузки.

Math load model identification is a difficult and time-consuming task which requires an expert qualified enough to work with it. Making the process of obtaining information about load response on power supply conditions change more automated will accelerate and simplify solving this problem. This paper deals with automated process of math load model identification description..

Введение

Процесс составления математической модели для расчета установившихся режимов электрической сети среди прочего включает в себя решение задачи моделирования электрических нагрузок.

К понятию характеристика нагрузки относят зависимость потребляемой мощности от параметров режима. Характеристики нагрузки оказывают определяющее влияние на моделирование нормальных и аварийных режимов энергосистем. Их учет необходим при расчетах установившихся режимов и определении устойчивости энергосистем, решении задач регулирования частоты и напряжения, оценке эффективности противоаварийной автоматики, анализе аварийных процессов и т. д. В то же время на сегодняшний день при расчете режимов используются упрощенные модели нагрузок или типовые статические характеристики, не отражающие реальной взаимосвязи между параметрами режима и величиной нагрузки [1, 2, 3].

В данной работе рассматриваются методические решения для идентификации СХН с целью дальнейшего использования полученных мо-

делей нагрузки для уточнения математической модели энергосистемы в задачах расчета установившихся режимов.

Виды характеристик нагрузки

Вид характеристики эквивалентной нагрузки крупного потребителя определяется множеством факторов: составом нагрузки (доля синхронных и асинхронных двигателей, печей, осветительной, бытовой, выпрямительной нагрузки и т. д.), режимом работы электроприемников, схемой их соединения, параметрами вводного трансформатора, наличием средств регулирования напряжения, мощностью компенсирующих устройств и т. д. [2–9]

Различают статические характеристики нагрузки (СХН) и динамические характеристики нагрузки [10].

Статические характеристики нагрузки по напряжению – это зависимости активной и реактивной мощности нагрузки от приложенного напряжения в установившемся режиме $P_n(U)$, $Q_n(U)$ при постоянной (как правило, номинальной) частоте. Для большинства крупных узлов энергосистемы СХН по напряжению описывается полиномом второй степени [5]:

$$P(U) = a_0 + a_1 U + a_2 U^2, \quad (1)$$

или в относительных единицах

$$P^*(U^*) = (b_0 + b_1 U^* + b_2 (U^*)^2). \quad (2)$$

Поскольку частота в системе изменяется незначительно, влиянием характеристик нагрузки по частоте на режим можно пренебречь. В дальнейшем в работе будут рассматриваться только СХН по напряжению.

Идентификация СХН

Автором был создан алгоритм идентификации СХН с учетом вышеперечисленных особенностей зависимости $P(U)$. Алгоритм составлен из нескольких модулей, каждый из которых решает отдельную подзадачу в рамках идентификации СХН, в виду чего является легко дополняемым и в дальнейшем может быть модифицирован. Для реализации созданного решения на ЭВМ выбран программный комплекс Matlab. Алгоритм получения СХН по данным измерений можно разделить на следующие этапы:

- 1) Фильтрация исходных данных.
- 2) Выделение интервалов постоянства нормальной мощности нагрузки. Определение коэффициентов модели СХН на каждом участке постоянства номинальной мощности нагрузки.
- 3) Нормирование коэффициентов.

4) Объединение одинаковых СХН.

5) Анализ и оценка полученных коэффициентов модели СХН.

Исходные данные представлены на рис. 1. Данные после фильтрации – на рис. 2. Первоначально массивы содержали 491 пар измерений, после кластеризации – 13 пар.



Рис 1. Исходные данные до фильтрации

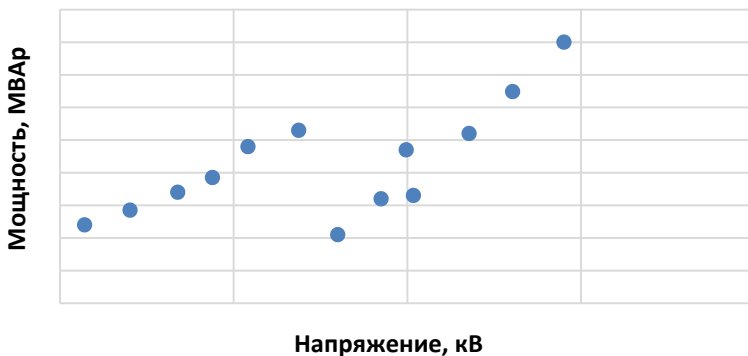


Рис. 2. Исходные данные после фильтрации

Выполнение тестируемого алгоритма дает следующие результаты: выделено два интервала стационарности нагрузки, на которых получены коэффициенты полиномиальной модели:

на интервале напряжения 3,42–3,68:

$$a_0 = 71,2; a_1 = -44,1; a_2 = 7,1;$$

на интервале напряжения 3,72–3,98:

$$a_0 = 43,1; a_1 = -31,1; a_2 = 5,5;$$

Графически полученный результат представлен на рис. 3.

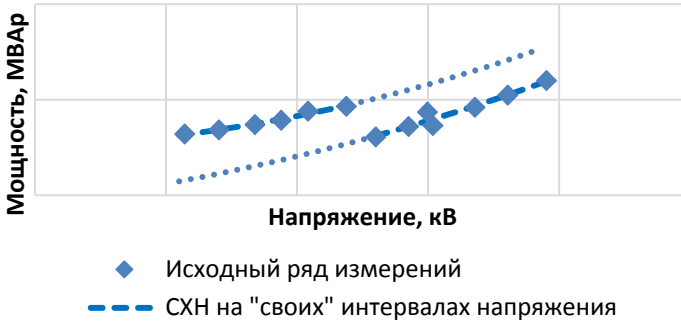


Рис. 3. Полученные СХН в именованных единицах

Для нормировки коэффициентов необходимо выбрать номинальное напряжение. Как и в предыдущем случае анализ имеющихся напряжений показывает, что в ходе эксперимента было получено фазное, а не линейное напряжение. Однако часть измерений получена на напряжениях, далеких от ближайшего класса напряжения – $\frac{6,0}{\sqrt{3}} = 3,464$ кВ, в связи с чем для каждого интервала стационарности нагрузки предпочтительнее использовать среднее значение напряжения: 3,55 кВ для первого и 3,85 – для второго. Тогда нормальная мощность будет равна: 3,82 Мвар для СХН, полученной на интервале 3,42–3,68 (кВ) (СХН 1) и 4,44 Мвар для СХН, полученной на интервале 3,72–3,98 (кВ) (СХН 2). Итак, нормированные коэффициенты:

$$b_0 = 18,6; b_1 = -40,9; b_2 = 23,3 \text{ – СХН 1;}$$

$$b_0 = 9,7; b_1 = -26,9; b_2 = 18,2 \text{ – СХН 2.}$$

СХН в о.е. представлены на рис. 4.

Поскольку разница между полученными параметрами моделей существенна, выделенные интервалы стационарности нагрузки относятся к разным характеристикам нагрузки и объединение моделей не выполняется.

Выборочно плохо обусловленных моделей не влияет на результат, т. к. обе полученных характеристики построена на значительном диапазоне напряжений.

Отсев характеристик со статистически незначимыми параметрами при количестве полученных моделей, равным двум, не выполняется.

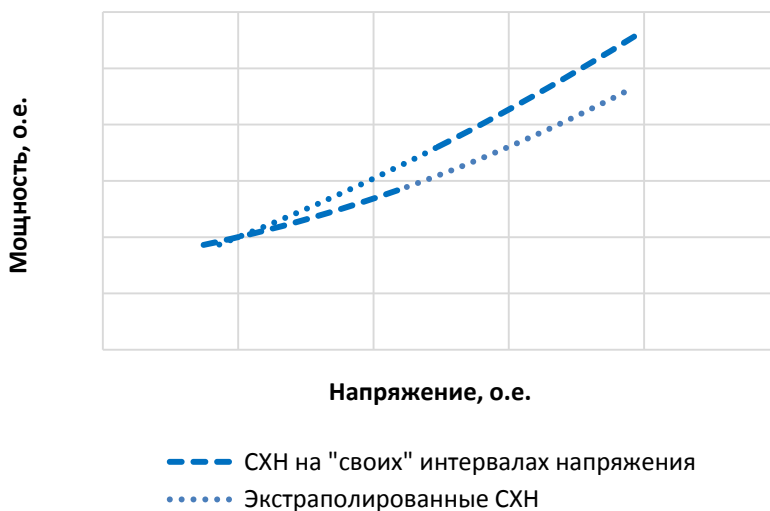


Рис. 4. Полученные СХН в относительных единицах

Аналогично предыдущему пункту для оценки результата рассчитаем регулирующий эффект нагрузки и сравним его с табличной величиной.

Для СХН 1 имеем:

$$\frac{\delta Q}{\delta U}(U = U_{\text{ном}} = 1) = b_1 + 2 \cdot b_2 = -40,9 + 2 \cdot 23,3 = 5,7;$$

для СХН 2:

$$\frac{\delta Q}{\delta U}(U = U_{\text{ном}} = 1) = b_1 + 2 \cdot b_2 = -26,9 + 2 \cdot 18,2 = 9,5.$$

Заключение

Величина $\frac{\delta Q}{\delta U}$ для предприятий промышленности находится в диапазоне 3,2–6,4 [11]. Регулирующий эффект СХН 1 попадает в указанный диапазон, в то время как регулирующий эффект СХН 2 больше верхней границы диапазона. Такой результат указывает на то, что моделирование нагрузки с помощью типовых моделей может давать существенные погрешности.

Разработанная методика идентификации СХН позволяет получать параметры моделей нагрузки по данным измерений. Разработанный алгоритм легко реализуется на ЭВМ и может быть модифицирован. Однако полученное решение на настоящий момент не может быть автома-

тизировано полностью, поскольку требует присутствия эксперта на некоторых этапах работы (выдвижение гипотезы о виде модели, анализ полученных результатов). Модели, полученные в результате применения алгоритма для обработки тестовых данных, показывают его высокую эффективность. Тесты на реальных данных не позволяют в полной мере оценить точность алгоритма, однако предварительная оценка (вычисление регулирующего эффекта нагрузки) также свидетельствует о высокой точности идентификации СХН.

1. Morison K., Hamadani H., Practical issues in load modeling for voltage stability studies // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003. P. 1392–1397.

2. Паздерин А.В., Юфеев С.В. Расчет установившегося режима электроэнергетической системы обобщенным методом Ньютона // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 5–6. С. 68–77.

3. Паздерин А.В., Егоров А.О., Кочнева Е.С., Самойленко В.О. Использование методических подходов теории оценивания состояния для расчета и достоверизации потоков электрической энергии в сетях // Электричество. 2014. № 10. С. 12–21.

4. Hajagos L., Danai B., Laboratory Measurement of Modern Loads Subjected to Large Voltage Changes for Use in Voltage Stability Studies, 1996.

5. Панкратов А.В., Полищук В.И., Бацева Н.Л. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем // Вестн. ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2015. Т. 15, № 1. С. 11–20.

6. Кравченко В.Ф., Нагай В.И., Бураков И.Ф., Золоев Б.П. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента // Изв. высш. учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2015. № 1 (182). С. 54–59.

7. Нагай В.И., Кравченко В.Ф., Бураков И.Ф., Золоев Б.П. Способы обработки данных активного эксперимента при определении статических характеристик мощности нагрузок узлов сети по напряжению // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2014. № 6. С. 67–71.

8. Шульпин А.А., Мурзин А.Ю., Бушуева О.А. и др. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой // Вест. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2014. № 6. С. 22–30.

9. Мышлянников Д.А., Фишов А.Г. Использование спорадических нарушений режима электрической сети для определения крутизны статических характеристик узлов нагрузок // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 176–180.

10. Паздерин А.В., Тащилин В.А., Чусовитин П.В., Шабалин Г.С. Расчет динамических характеристик энергосистемы по частоте с помощью обобщенных выражений // Научное обозрение. 2014. № 8–2. С. 604–612.

11. Экспериментальное исследование режимов энергосистем / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович и др. ; под ред. С.А. Соколова. М. : Энергоатомиздат, 1995. 448 с.

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ НАГРУЗКИ НА ВЕЛИЧИНУ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

А.С. Тавлинцев, М.Е. Шорикова
Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

Снижение погрешности расчета установившегося режима электрической сети возможно при переходе к моделированию нагрузки с помощью статических характеристик. В ходе их идентификации были проведены серии вычислительных экспериментов, результатом которых был общий вид функции, описывающей изменение технологического процесса – траекторию перехода с одной СХН на другую. На основе приведенного метода выявления зависимостей такого типа может быть разработан автоматизированный алгоритм.

Decreasing error of an electrical mode calculation is possible if static load voltage models are used. While solving its' identification problem computer experiment series were made to detect relations, which describe voltage changes under load oscillations conditions. Actually, it is a transit trajectory from one static load voltage characteristic to another. On the basis of this trajectory detection method an automated algorithm can be developed.

Введение

При создании расчетных моделей электрической сети в настоящее время нагрузочные узлы моделируются, как правило, постоянными значениями активной и реактивной мощностей [1]. Это допущение об отсутствии зависимости мощности нагрузки от величины питающего напряжения вносит дополнительную погрешность в результат расчета режима [2, 3, 4]. Снизить указанную погрешность позволяет добавление в модель функций, называемых статическими характеристиками нагрузками по напряжению [1].

В данной статье под статическими характеристиками нагрузки по напряжению (СХН) понимаются функции описания реакции комплексной нагрузки на изменение напряжения с учетом действий устройств автоматики и персонала.

Моделирование нагрузки с помощью СХН позволяет снизить погрешность расчета максимально допустимых перетоков мощности (МДП) по условиям статической устойчивости [5]. При учете зависимости мощности от величины питающего напряжения происходит увели-

чение МДП по контролируемым сечениям за счет снижения потребления реактивной мощности [2].

В расчетах СХН принято аппроксимировать полиномами второй степени:

$$P = P_{\text{баз}} \cdot \left(a_0 + a_1 \cdot \frac{U}{U_{\text{ном}}} + a_2 \cdot \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2} \right); \quad (1)$$

$$Q = Q_{\text{баз}} \cdot \left(b_0 + b_1 \cdot \frac{U}{U_{\text{ном}}} + b_2 \cdot \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2} \right), \quad (2)$$

где P, Q – мощности нагрузки;

$P_{\text{баз}}, Q_{\text{баз}}$ – базисная мощность нагрузки;

$U, U_{\text{ном}}$ – напряжение на шинах потребителя, номинальное напряжение;

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ – коэффициенты полинома в относительных единицах.

Цель исследования

Цель данного исследования – выявление регрессионных уравнений, описывающих изменение технологического процесса в задаче идентификации СХН по напряжению [1, 2, 6–9].

Теоретические основы

При решении задачи идентификации СХН возникает необходимость проведения оценки результатов измерительного эксперимента. Полученные на основе данных измерительных комплексов временные ряды мощности и напряжения делятся на интервалы, на каждом из которых аппроксимируются полиномом второй степени с уровнем статистической значимости модели 95 %. Результатом будет множество регрессионных уравнений, описывающих либо зависимость мощности от напряжения, либо напряжения от мощности.

Зависимостью вида $P=f(U)$ описывается реакция комплексной нагрузки на изменение питающего напряжения, а зависимостью $U=f(P)$ – ответная реакция энергосистемы на изменение базисной мощностью нагрузки.

Для того чтобы выявить зависимости вида $U=f(P)$, была выдвинута гипотеза, что данные регрессионные уравнения будут описывать траекторию перехода с одной СХН на другую.

На основе этой гипотезы можно создать алгоритм фильтрации, разделяющий регрессионные уравнения на два вида путем сравнения на основе результатов анализа их формы.

Необходимо также сделать допущение, что при любых видах и формах СХН комплексных узлов форма траектории перехода с одной СХН на другую неизменна по виду (падающая) (рис. 1).

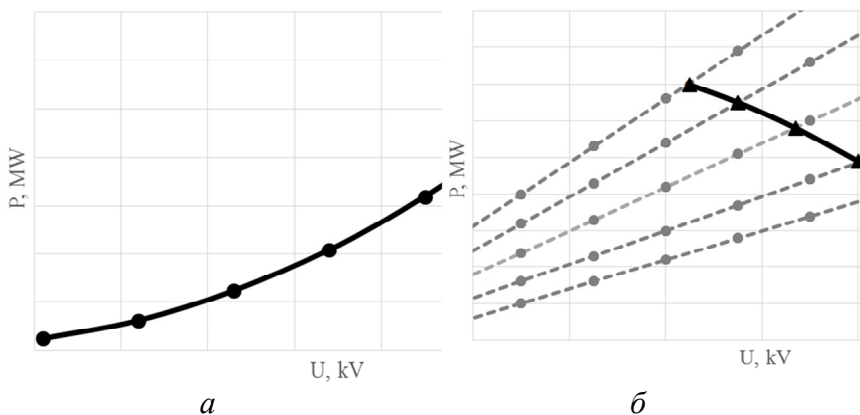


Рис. 1. а – зависимость вида $P = f(U)$; б – зависимость вида $U = f(P)$.

Экспериментальная проверка гипотезы

Для проверки возможности реализации вышеописанного фильтра с учетом принятого допущения были проведены три серии вычислительных экспериментов на базе 14-узловой IEEE схемы (рис. 2):

- изменение базисной мощности одного узла (узел 13);
- изменение базисной мощности двух смежных узлов (узлы 12 и 13) при условии, что процесс изменения мощности в одном узле восходящий, в другом – нисходящий;
- изменение базисной мощности в узлах всего района сети 110 кВ.

В серии опытов, где базисная мощность изменялась только в узле 13, способ задания СХН менялся для всего района 110 кВ. Результаты опыта приведены на рис. 3 и 4.

В каждой серии опытов были рассмотрены четыре случая для различных способов задания СХН комплексных узлов:

- преобладающая асинхронная нагрузка ($a_1 = 3.7$; $a_2 = -7.0$; $a_3 = 4.3$);
- $P_{\text{баз}}, Q_{\text{баз}} = \text{const}$ ($a_1 = 1$; $a_2 = 0$; $a_3 = 0$);
- $I = \text{const}$ ($a_1 = 0$; $a_2 = 1$; $a_3 = 0$);
- $Y = \text{const}$ ($a_1 = 0$; $a_2 = 0$; $a_3 = 1$).

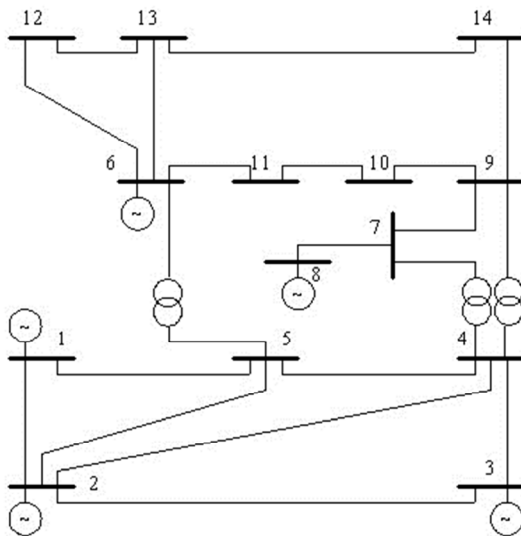


Рис. 2. Типовая 14-узловая IEEE схема

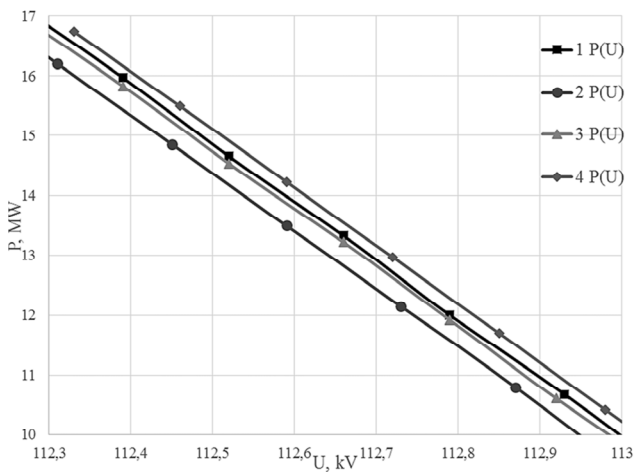


Рис. 3. Зависимость $P = f(U)$ для узла 13

Выводы

- В диапазоне напряжений, близком к номинальному, способ задания СХН в узлах сети не оказывает существенного влияния на вид полученной зависимости. Также характеристики имеют схожий вид: все они являются нисходящими.

- В результате проведенных серий вычислительных экспериментов был получен общий вид траектории перехода с одной СХН на другую. Для всех рассмотренных случаев тангенс угла наклона касательной отрицательный (рис. 1).
- На основе представленного метода разделения регрессионных уравнений возможна разработка автоматического алгоритма.
- Выявленные регрессионные уравнения вида $P = f(U)$ могут использоваться для решения задачи идентификации СХН.

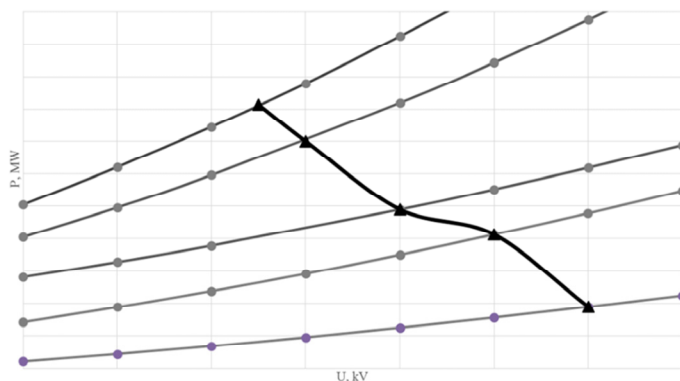


Рис. 4. Траектория перехода с одной СХН на другую

1. Hajagos L., Danai B., Laboratory Measurement of Modern Loads Subjected to Large Voltage Changes for Use in Voltage Stability Studies, 1996.
2. Панкратов А.В., Полищук В.И., Бацева Н.Л. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем // Вестн. ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2015. Т. 15, № 1. С. 11–20.
3. Паздерин А.В., Юферев С.В. Расчет установившегося режима электроэнергетической системы обобщенным методом Ньютона // Изв. высш. учеб. заведений // Проблемы энергетики. 2008. № 5–6. С. 68–77.
4. Паздерин А.В., Егоров А.О., Кочнева Е.С., Самойленко В.О. Использование методических подходов теории оценивания состояния для расчета и достоверизации потоков электрической энергии в сетях // Электричество. 2014. № 10. С. 12–21.
5. Morison K., Hamadani H., Practical issues in load modeling for voltage stability studies // IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2003. P. 1392–1397.

6. Кравченко В.Ф., Нагай В.И., Бураков И.Ф., Золоев Б.П. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2015. № 1 (182). С. 54-59.

7. Нагай В.И., Кравченко В.Ф., Бураков И.Ф., Золоев Б.П. Способы обработки данных активного эксперимента при определении статических характеристик мощности нагрузок узлов сети по напряжению // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2014. № 6. С. 67–71.

8. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой / А.А. Шутьпин, А.Ю. Мурзин, О.А. Бушуева и др. // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2014. № 6. С. 22–30.

9. Мышлянников Д.А., Фишов А.Г. Использование спорадических нарушений режима электрической сети для определения крутизны статических характеристик узлов нагрузок // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 176–180.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ С ПОВЫШЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

А.-М.В. Тимофеева, Н.С. Бурянина, Ю.Ф. Королюк

Северо-Восточный Федеральный университет,
Якутск

В статье рассматривается проблема ограниченной пропускной способности высоковольтных линий электропередачи. Целью статьи является разработка новой конструкции воздушных линий электропередач, позволяющих передавать по ним мощность, превышающую мощность аналогичных традиционных линий. Для решения рассмотренной проблемы предлагается новая конструкция. Результаты исследования показали, что пропускная способность предлагаемой линии в 1,3–1,5 раза больше, чем у традиционных двухцепных линий.

In this article the problem of limited bandwidth high voltage transmission lines is discussed. The aim of the article is to develop a new design of overhead transmission lines, allowing them to transmit higher power than similar traditional lines. To solve this problem a new design is proposed. The results showed that the bandwidth of the proposed line is 1.3-1.5 times higher than that of traditional double-circuit lines.

Проектирование высоковольтных линий электропередачи имеет важное значение в формировании потенциала развития как электроэнергетики в целом, так и дает возможность развиваться современным городам и энергоемким производствам. Развитие промышленности, транспорта и других отраслей народного хозяйства требует непрерывного роста производства электроэнергии и совершенствования ее передачи и распределения. Действующие линии электропередачи, как правило, сильно загружены и не могут обеспечить энергией в полном объеме новых потребителей. Поэтому вопросы, связанные с созданием линий электропередачи с повышенной пропускной способностью, являются актуальными и на данном этапе развития электрических систем.

При разработке нового технического решения выполнены обследование и анализ существующих и разрабатываемых воздушных линий электропередачи в нашей стране и за рубежом.

Для решения подобных ситуаций, большинство линий можно оборудовать проводом большего сечения, либо выполнить проект воздушной линии с применением двухцепной схемы, тем самым удвоив ее пропускную способность. Но этот способ требует дополнительных затрат и,

как следствие, не улучшает технико-экономические показатели электропередачи.

А повышение номинального напряжения также связано с дополнительными затратами, необходимыми на изоляцию опоры и электрооборудование подстанций. По условиям экологии окружающей среды не всегда возможно осуществить перевод воздушной линии электропередачи на более высокое напряжение.

Совместное применение последовательной конденсаторной и параллельной индуктивной компенсации на воздушных линиях электропередачи является еще более эффективным способом повышения пропускной способности. Но для дальних электропередач требует дополнительных сложных установок и надежной эксплуатации и обслуживания их.

Наиболее близкой к предлагаемой линии является линия с расщепленными фазными проводами. Линии с расщепленными фазами имеют меньшие индуктивные сопротивления и большую емкостную проводимость, определяемые расстояниями между проводами внутри расщепленной фазы. Однако эти расстояния ограничены габаритами самой линии. Увеличение размеров всех трех фаз приводит к увеличению габаритов самой линии, что ни экономически, ни экологически не оправдано.

Для повышения пропускной способности порой достаточно модернизации существующей воздушной линии электропередачи.

Цель данного исследования заключается:

а) в разработке конструкции воздушных линий электропередач с повышенной пропускной способностью;

б) в исследовании параметров воздушных линий новой конструкции.

Исходя из цели, поставлены следующие задачи: разработать новые конструкции высоковольтных линий электропередач, позволяющих передавать по ним мощность, превышающую мощность аналогичных традиционных линий электропередач; выполнить технико-экономический анализ основных экономических показателей и оценить эффективность их применения по сравнению существующими линиями.

Указанная цель достигается тем, что два проводника, состоящие из одного или нескольких расщепленных проводов подвешиваются на опорах линии электропередачи на разной высоте, причем нижний проводник, кроме крепления на опорах, крепится к верхнему проводнику так, что стрела его провеса получается меньше стрелы провеса верхнего проводника. Таким образом расстояние между проводниками изменяется от десятков сантиметров до нескольких метров. Тем самым увеличивается эквивалентный радиус провода фазы, приводящий к существенному снижению индуктивного сопротивления и увеличению емкостной проводимости. Кроме того, появляется возможность сближения фаз, так

как уменьшается амплитуда раскачивания проводов. В пределе, когда нижний проводник натягивается горизонтально, раскачивание фаз исключено полностью.

Структурная схема предлагаемой линии приведена на рис. 1, где изображена часть пролета линии электропередачи с фазами, состоящими из двух проводов, расположенных на разной высоте.

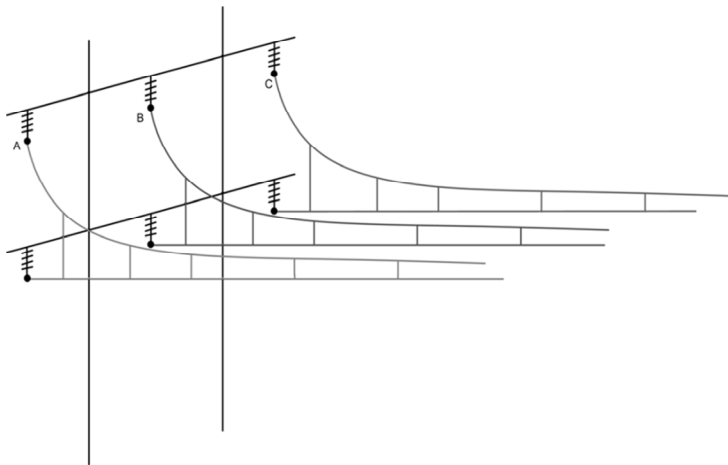


Рис. 1. Конструкция линии электропередачи с повышенной пропускной способностью

На опоре к изоляторам крепятся верхний и нижний провода. Кроме крепления на изоляторах, нижний провод подвешивается к верхнему металлическими проводниками. Таким образом, расстояние между проводами фазы изменяется от минимального в середине пролета до стрелы провеса на опоре. Принципиально практически нет ограничений на расстояния между проводами фазы. Достаточно увеличить высоту опоры. Кроме того, за счет разной стрелы провеса верхнего и нижнего проводов уменьшается амплитуда раскачивания фаз линии, что позволяет их сблизить. Тем самым еще больше уменьшается индуктивное сопротивление и увеличивается емкостная проводимость линии. Кроме того, уменьшается зона отчуждения земли по обе стороны линии.

На механические нагрузки проверены провода марки АС-240/32 и А-240. Воздушная линия (ВЛ) имеет напряжение 220 кВ, расположена в населенной местности типа В, относящейся к первому району по гололеду и ко второму ветровому району, длина пролета $L = 200$ м. Основные значения температур:

минимальная $t_{\min} = -64^\circ\text{C}$

максимальная $t_{\max} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$
среднегодовая $t_{\text{сrg}} = -10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Механический расчет проводов ВЛ произведен по методу допускаемых напряжений, расчет изоляторов – по методу разрушающих нагрузок. Нагрузки, действующие на провода ВЛ, определены собственным весом провода, величиной ветрового напора и дополнительной нагрузкой, обусловленной гололедом. По результатам расчета во всех режимах напряжение в материале провода в пределах нормы.

Произведен расчет электрических параметров. Принципы определения электрических параметров воздушных линий зависят от конфигурации фазы и их расположения. Сближение расщепленных фаз позволяет добиться положительного влияния электромагнитных полей, образующихся вокруг проводов расщепленных фаз, что ведет к уменьшению индуктивности и увеличению емкости электропередачи. Окончательные расстояния между проводами фаз линии значительно превосходят допустимые, принимаемые в зависимости от диэлектрической прочности воздушного промежутка провод – провод, рассчитанного по наибольшим напряжениям, возникновение которых возможно между фазами.

Исследование экономической эффективности предлагаемых воздушных линий электропередачи повышенной пропускной способности выполнялось методом технико-экономического анализа.

В табл. 1 приведено сравнение одцепной линии 220 кВ новой конструкции с двухцепными линиями 220 кВ традиционного исполнения.

В предлагаемой конструкции ширина просеки уменьшается в два раза, т. е. минимизируются неблагоприятные воздействия на окружающую среду. Потери электроэнергии меньше за счет уменьшения потерь на корону. При этом пропускная способность будет больше, чем у двухцепных линий традиционного исполнения. Можно заменить двухцепную ВЛ 220 кВ одноцепной с натуральной мощностью в 300 МВт. Стоимость предлагаемых одноцепных линий меньше стоимости двухцепных того же класса напряжения и одноцепных следующего класса.

Разработана новая конструкция воздушной линии электропередачи с разновысотной подвеской проводов, содержащая два проводника, каждый из которых состоит из одного или нескольких проводов, отличающаяся тем, что проводники подвешены на разной высоте, нижний проводник имеет меньшую стрелу провеса и подвешен к верхнему проводнику посредством металлических проводников.

Таблица 1

Технические параметры ВЛ 220 кВ

Тип ВЛ	Двухцепные ВЛ-220 кВ тради- ционного испол- нения	Одноцепные ВЛ-220кВ новой конструк- ции
Марка провода	АС-300/66	АС-240/32 А-240
x_0 , Ом/км	0,43	0,17
$b_0 \cdot 10(-6)$, См/км	2,6	6,71
Волновое со- противление, Ом	158,29	145,12
Натуральная мощность, МВт	240	300,87

Предлагаемая конструкция линии электропередачи является компромиссным решением проблемы повышения пропускной способности высоковольтных линий. Расчеты показывают, что пропускную способность предлагаемой линии можно увеличить в 1,3–1,5 раз по сравнению с пропускной способностью двухцепной линии. При этом для ее осуществления не требуется разработка нового оборудования. Также в плане экологического воздействия новую конструкцию линий электропередачи можно считать оптимальным.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ УТИЛИЗАЦИИ НА КОГЕНЕРАТИВНЫХ СТАНЦИЯХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

К.А. Цой, А.К. Полей, М.А. Макаров
Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток

В статье приведен расчет эффективности внедрения технологии низкотемпературной утилизации теплоты продуктов сгорания на примере Мини-ТЭЦ «Центральная», на о. Русском, г. Владивосток, РФ. Произведен сопоставительный анализ эффективности использования капитальных средств при строительстве различных схем теплоснабжения с источником тепла от ТЭЦ малой мощности.

There is a calculation of efficiency of implementation of the low-temperature utilization of warmth of combustion products technology on the example of Mini-CHPP Tsentralnaya, Russian Federation, Vladivostok, island Russky in the article. The comparative analysis of efficiency use of capital means in construction of different diagrams of heat supply with heat source from combined heat and power plant of low power is made.

Вступление

Ускоренное развитие газовой энергетики на территории Дальневосточного федерального округа, в том числе Приморского края, создало условия для перевода стационарных тепловых установок на сжигание природного газа, а также для строительства новых энергетических объектов, предусматривающих сжигание природного газа в качестве основного топлива.

По результатам строительства инфраструктуры о. Русского в процессе подготовки к саммиту Азиатско-Тихоокеанского экономического сотрудничества в 2012 году (АТЭС 2012), для автономного обеспечения тепловой и электрической энергии был реализован проект строительства трех мини-ТЭЦ: «Северная», «Центральная», «Океанариум» [1].

Мини-ТЭЦ запроектированы по принципу малой распределенной когенерации с использованием газотурбинных установок (ГТУ).

Сводные тепломеханические характеристики указанных выше станций приведен в табл. 1.

Таблица 1

Сводные тепломеханические характеристики станций на о. Русский

Показатель	Ед-ца измерения	Мини-ТЭЦ		
		«Северная»	«Центральная»	«Океанариум»
Количество ГТУ и единичная мощность	Шт. × МВт	2 · 1,8	5 · 6,6	2 · 6,6
Количество котлов-утилизаторов и единичная мощность	Шт. × МВт	2 · 4,3	5 · 10,68	2 · 10,68
Количество пиковых водогрейных котлов и единичная мощность	Шт. × МВт	2 · 2,0	6 · 15,0	2 · 6,5
Установленная электрическая мощность	МВт	3,6	33,0	13,2
Установленная тепловая мощность	МВт	12,6	143,4	34,36
Проектная максимальная тепловая нагрузка	МВт	12,24	126,05	26,03
Фактическая максимальная тепловая мощность	МВт	–	33,5	4,652

По результатам испытаний от 27 февраля 2014 г. был выполнен расчет усредненных показателей удельных расходов топлива (УРУТ), которые составили 99,08 кг/Гкал и 258 г/ (кВт · ч). Расчетный коэффициент использования топлива составил 78 % [1].

Описание технологии глубокой утилизации

Как известно, коэффициент использования топлива в первую очередь связан с полнотой использования тепловой энергии топлива. Известно, что традиционным ограничением полноты использования топлива является температура продуктов сгорания на выходе из поверхностей нагрева. Причина ограничения – исключение процессов конденсации водяных паров в стальных газоходах и в дымовых трубах, так как данные процессы вызывают агрессивную коррозию, обмерзание, и как следствие, преждевременное разрушение газоотводящего тракта.

Применение теплообменников – низкотемпературных утилизаторов тепловой энергии (далее – НУТ), работающих в режиме конденсации водяных паров позволит существенно повысить технико-экономические показатели работы станций.

В трудах [1, 2, 3] приведен тепловой расчет конденсационного теплообменника с целью повышения эффективности использования топлива. Результаты расчета дают веское обоснование необходимости внед-

рения данной технологии в процессах генерации тепловой и электрической энергии на крупных тепловых станциях.

На рис. 1 приведена предлагаемая схема внедрения технологии низкотемпературной утилизации тепла продуктов сгорания. Технология предполагает включение в газовый тракт дополнительного теплообменника-утилизатора (НУТ). При включении НУТ за пиковым водогрейным котлом (ПК) схема аналогична.

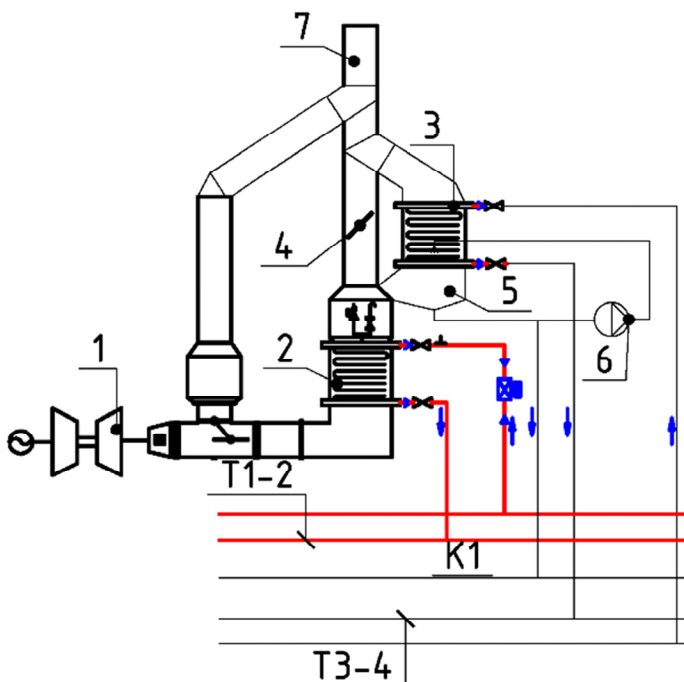


Рис. 1. Схема включения НУТ:

- 1 – ГТУ; 2 – котел-утилизатор (КУ); 3 – НУТ; 4 – байпас;
- 5 – конденсатосборник; 6 – насос орошения; 7 – дымовая труба;
- T1-2 – тепловая сеть; T3-4 – циркуляционный трубопровод;
- K1 – линия отвода конденсата

Принцип предлагаемой технологии основывается на применении следующих ключевых моментов:

1. Изготовление корпуса НУТ, поверхностей нагрева и других поверхностей нагрева из коррозионно-стойких материалов.

2. Применение не только традиционного поверхностного теплообмена, а также использование тонкого распыления выделившегося конденсата на входе продуктов сгорания в НУТ, для предварительного обеспечения снижения их температуры за счет контактного теплообмена.

3. Применение последней поверхности нагрева НУТ из трубки диаметром 15 мм, установленной в пористом теле, для обеспечения минимального каплеуноса в выходной газоход.

4. Применение обводного газохода (байпаса), управляемого программируемым контроллером по сигналу абсолютной влажности продуктов сгорания после смешения на уровне не более 80%. Данное автоматическое регулирование обеспечит отсутствие конденсации водяных паров в существующих дымовых трубах, защитив их таким образом от коррозии.

Расчет технологической эффективности

Исходными данными для расчета являются результаты пусконаладочных испытаний оборудования станции, а также такие заданные характеристики процесса, как температура продуктов сгорания на выходе из теплообменника, температура охлаждающей воды на входе и выходе из теплообменника.

Выполненный расчет предусматривает определение расчетных данных: расхода продуктов сгорания через теплообменник, абсолютной влажности продуктов сгорания на входе и выходе из теплообменника, расход конденсата из теплообменника и т. д.

В табл. 2 сведены наиболее важные результаты выполненного расчета.

Расчет экономической эффективности

Исходными данными для расчета являются результаты, сведенные в табл. 3. Текущий годовой отпуск принят по отчетам эксплуатирующей организации. Номинальный годовой отпуск рассчитан по проектным характеристикам систем теплоснабжения о. Русский.

Принята цена на природный газ, по данным ОАО «Газпром», для оптовой торговли объектам тепловой энергии, составляет 2,5 руб/нм³.

Проведение эксперимента

Для подтверждения расчетных данных предусматривается установка системы конденсации водяных паров из продуктов сгорания. Назначение данной установки – охлаждение уходящих газов ниже температуры «точки росы» для решения следующих задач:

1. детальное исследование «зоны конденсации» – измерение изменений скоростей и температур уходящих газов в области конденсации водяных паров в уходящих газах;

2. определение оптимальной скорости уходящих газов для наиболее эффективного прохождения теплообменных процессов;

Таблица 2

**Результаты расчета энергетической эффективности внедрения
технологии НУТ на мини-ТЭЦ «Центральная»**

Показатель	Ед-ца измерения	Режим работы			
		Текущий		Проектный	
		ПК без НУТ 2 ед.	ПК с НУТ 2 ед.	ГТУ+КУ 4 ед.	ПК 5 ед.
Присоединенная тепловая нагрузка	МВт	33,5	33,5	42,72	83,33
Выработка теплоты от НУТ	МВт	—	3,4	4,6	8,5
Теплопроизводительность единицы НУТ	МВт	—	1,7	1,2	1,7
Расход охлаждающей воды на единицу НУТ	т/ч	—	36,9	24,8	36,9
Суммарный расход охлаждающей воды	т/ч	—	207,0	242,7	32,9
Удельный расход условного топлива	кг/ МВт	112,37 8	101,961	101,631	101,961
Коэффициент использования топлива по высшей теплоте сгорания	%	78	91,35	91,47	91,35

Таблица 3

**Результаты расчета экономической эффективности внедрения
технологии НУТ на мини-ТЭЦ «Центральная»**

Показатель	Ед-ца измерения	Мини-ТЭЦ		
		«Северная»	«Центральная»	«Океанариум»
Текущий годовой отпуск тепловой энергии	МВт	-	58 342,640	-
Проектный годовой отпуск тепловой энергии	МВт	34 916,460	359 782,710	63 883,970
Годовая потребность в топливе	млн нм ³	4,277	44,167	7,825
Годовая потребность в топливе при применении технологии НУТ	млн нм ³	3,880	39,856	7,100
Экономический эффект от внедрения технологии	млн руб	0,993	10,776	1,813

3. определение оптимальной компоновки поверхностей нагрева в теплообменнике-охладителе уходящих газов;
4. определение изменения объемного расхода уходящих газов до и после конденсации находящихся в них водяных паров;
5. оценка влияния избыточного давления (или глубины разрежения) уходящих газов на температуру «точки росы»;
6. сбор конденсата для последующего изучения его компонентного состава и разработки предложений по его полезному использованию.

Установка представляет собой комплекс оборудования с подводящими и отводящими газоходами и трубопроводами охлаждающей воды. Предусмотрена линия отвода конденсата. Предусмотрены места и крепления под КИПиА. Реализована возможность транспортировки и быстрого монтажа установки.

Варианты схем подключения показаны на рис. 2.

Установка представлена в двух вариантах:

а) монтаж экспериментальной установки осуществляется на напорной стороне тягодутьевой машины – вентилятора (2). Таким образом, оборудование работает под избыточным давлением и возможно «выбывание» уходящих газов из неплотностей оборудования и газоходов;

б) монтаж экспериментальной установки осуществляется на всасывающей стороне тягодутьевой машины – вентилятора (2). Таким образом, оборудование работает под разрежением и возможно «подсасывание» воздуха из окружающей среды и разбавление ими уходящих газов.

Проблемы реализации установки НУТ

Результаты расчета, представленные в табл. 2, отражают необходимый расход охлаждающей воды с температурой на входе 5 °С, температурой на выходе 45 °С. Рассматриваемая станция подключена к закрытой двухтрубной системе теплоснабжения, приготовление воды на ГВС в которой реализуется у потребителя. Следовательно, имеет место проблема реализации технологии НУТ, которая заключается в отсутствии необходимого количества охлаждающей воды на источнике.

Возможное решение данной проблемы заключается в пересмотре системы теплоснабжения с переводом в режим четырехтрубной системы с приготовлением воды на ГВС на источнике тепловой энергии. Это позволит производить предварительный подогрев холодной воды в НУТ, обеспечив необходимый циркуляционный расход.

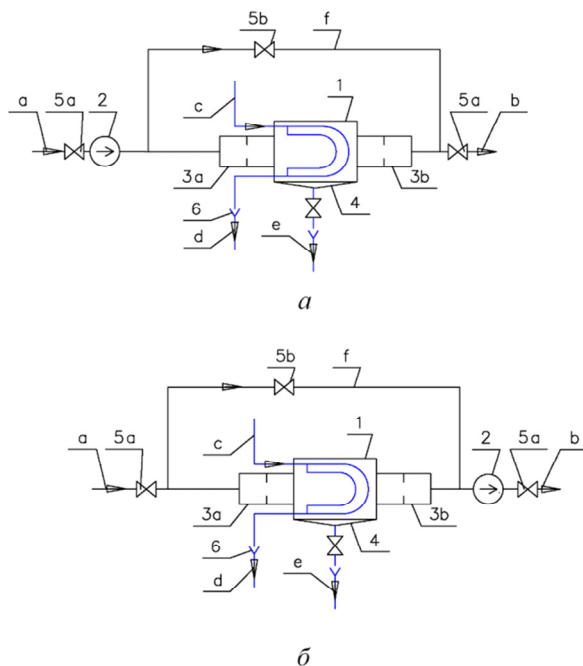


Рис. 2. *а* – установка на напорной линии; *б* – установка на «всасе»:
а – подвод уходящих газов; *б* – отвод уходящих газов; *с* – подвод охлаждающей воды; *д* – отвод охлаждающей воды; *е* – отвод конденсата;
ф – обводная линия; 1 – теплообменник; 2 – вентилятор; 3а – расходомер на входе; 3б – расходомер на выходе; 4 – конденсатосборник;
 5а – запорный заслонки; 5б – регулирующая заслонка;
 6 – отборная воронка



Рис. 3. Фото измерительных участков по газовому тракту



Рис. 4. Фото общего вида корпуса теплообменника

Выводы

1. Использование низкопотенциальной теплоты продуктов сгорания природного газа – приоритетная задача в повышении энергоэффективности использования природными ресурсами.
2. Внедрение технологии обеспечит очень высокие экономические показатели, ориентировочный срок окупаемости составляет 1–2 года.
3. Исследование теплофизических процессов, протекающих при конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания природного газа обеспечит возможность получить расчетные зависимости показателей тепломассообмена, а также обеспечит возможность разработки теплообменника промышленного образца наибольшей эффективности и наименьшей металлоемкостью.

1. Штым К.А., Полей А.К., Установки когенерации на о. Русский // Энергетик. 2015. № 1. С. 11–13.

2. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 139 с.

3. Данилов О.Л., Мунц В.А., Использование вторичных энергетических ресурсов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 154 с.

КРИТЕРИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОРСКИХ ПЛАТФОРМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТАРИЯ АЛГЕБРЫ КОНЕЧНЫХ ПРЕДИКАТОВ

С.Г. Черный

Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь

Важной составляющей процесса автоматизации является достаточность его информационной поддержки, помимо управляемого системой автоматизации оборудования с его характеристиками и проблемами совместимости. Работа буровой станции (аспекты информатизации и автоматизации), особенно при освоении больших глубин, сталкивается со множеством неопределенностей, что постоянно вызывает аварийные и чрезвычайные ситуации, возникающих с частотой, не характерной для других отраслей. Помимо недостаточности данных, здесь также существует проблема высокой скорости их изменения. Разрабатывая интеллектуальный компонент морских буровых платформ используем математический инструментарий алгебры конечных предикатов.

An important component of the process of automation is the adequacy of its information support. Accounting for all the components of the information system requires systematization approach (automation of drilling is a complex process; compatibility problems; the problem of informational uncertainty; intelligent decision support systems; the expert knowledge base; automated brake control; automated speed control; automation and control of fluids while drilling; the problem of energy supply). Developing intelligent component of offshore drilling platforms use mathematical tools of algebra finite predicates.

Характерно, что проблемы внедрения автоматизации бурового процесса начинаются с аспектов, не связанных непосредственно с условиями или местом добычи. Техническое обеспечение буровой включает множество компонентов, подавляющее большинство из которых принадлежит разным производителям. В контексте автоматизации это существенно усложняет задачу, так как от управляемого оборудования в течение длительных периодов времени требуется совместная работа под управлением единой системы автоматизации.

В свою очередь высокий уровень автоматизации по определению предполагает реализацию обмена данными между всеми компонентами

системы, а значит, и полную их совместимость по методам, протоколам, форматам передачи данных и видам управляющих воздействий как фундамент для внедрения автоматизации процесса.

Важно отметить, что решение, отлаженное под определенную конфигурацию оборудования или геофизические условия и не подходящее для других установок, то есть, иными словами, локализованные решения экономически затратны и требуют вмешательства и контроля со стороны человека. В этой связи перспективна и востребована разработка новой технологии обмена данными в описанных условиях, либо необходимо рассматривать возможность применения в нефтегазовой отрасли решений, существующих в других отраслях. В любом случае, на первый план выходят вопросы обеспечения их стандартизации, сертификации, совместимости, возможности работать в реальном времени, возможности резервирования данных, их защиты и передачи для анализа и накопления баз данных на удаленные объекты. В настоящее время буровые сервисные компании, операторы, изготовители оборудования и т. д. используют, как правило, разные стандарты переносимости данных.

Метод косвенной оценки обобщенного показателя качества функционирования подсистем морской буровой платформы (МБП).

Оценка качества функционирования соответствующей МБП может быть сведена к оценке качества выходных параметров, находящихся в зависимости от начального состояния системы управления, надежных характеристик вычислительных систем (ВС) и входных сообщений \overline{a}_{ij} . Для η реализации ($\eta = 1, 2, \dots, \eta^*$) эта зависимость имеет вид

$$\{\overline{\varphi}\}_0^{T_\eta} = \Phi \left[Y_{0\eta}, \{\overline{a}\}_0^{T_\eta}, \omega_\eta \right],$$

где $Y_{0\eta}$ – начальное состояние МБП в η – реализации; $\{\overline{a}\}_0^{T_\eta}$ – последовательность входных сигналов за время функционирования системы $(0 - T_\eta)$, упорядоченная относительно времени их поступления; ω_η – некоторая функция, характеризующая правильность выполнения алгоритмических предписаний.

За обобщенный показатель качества функционирования соответствующего компонента МБП можно принять вероятность достижения цели ее функционирования

$$Q = P(H_{\text{ПС}}),$$

где $H_{\text{ПС}}$ – событие, заключающееся в достижении цели функционирования соответствующей подсистемой.

Величина Q может быть определена путем статистического моделирования с воспроизведением ожидаемого диапазона условий на входе ПС. Факт достижения цели функционирования соответствующей ПС в любой из конкретных η -реализаций ($\eta = 1, 2, \dots, \eta^*$) этого процесса можно установить непосредственно или косвенно. Непосредственная оценка возможна при наличии эталонных значений выходных сигналов, $\{\overline{\varphi_{\text{эт}}}\}_0^{T_\eta}$, для каждой из η -реализаций. Цель функционирования при этом считается достигнутой, если для каждого из компонентов вектора $\overline{\varphi_m} \in \{\overline{\varphi}\}_0^{T_\eta}$ справедливо неравенство:

$$\varphi_{j\eta}^m - \varphi_{\text{эт}\eta}^m \leq \Delta_{j\eta}^m; m = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, j,$$

где $\Delta_{j\eta}^m$ – допустимое отклонение фактического значения выходного сигнала от эталонного в j -м такте работы η -ой реализации.

На практике сравнительно редко удастся установить эталонные значения $\{\overline{\varphi_{\text{эт}}}\}_{0\eta}^T$ для любого $\{\overline{a}\}_0^{T_\eta} \in A$, где A – ожидаемый диапазон условий на входе подсистемы МБП. В этом случае достижение цели функционирования подсистемы может быть установлено по эффекту от суммарного воздействия выходных сигналов на управляемый объект, т. е. косвенной оценкой.

Для проведения статистического моделирования с целью получения обобщенного показателя качества соответствующей подсистемы МБП косвенным методом необходимо использовать модуляторы входной информации для соответствующей подсистемы МБП и модель управляемого объекта. Качество выходных сигналов соответствующих подсистем МБП оценивается по реакции управляемого объекта на эти сигналы. При этом цель функционирования соответствующей подсистемы МБП считается достигнутой, если достигнута цель функционирования управляемого объекта.

При определении эффективности взаимодействия компонентов МБП возникают затруднения, обусловленные тем, что любая система является подсистемой некоторой другой системы более высокого уровня и между ними возникает взаимосвязь.

Разрабатывая интеллектуальный компонент МБП используем математический инструментальный алгебры конечных предикатов (исследованиями математического инструментария алгебры конечных предикатов обширно отражены в работах проф. Н.В. Шароновой). С универсумом элементов U , поступающим на обработку в информационную систему МБП связаны некоторые знания, относящиеся к персонифицированному

интеллектуальному ресурсу администратора сети. Причем наборы правил или действий операторов МБП можно представить как приближенное множество.

Для ввода определения приближенного множества обычно используют аппроксимацию множеств. Пусть \approx – отношение неразличимости на универсуме. Нижняя аппроксимация множества $X \subseteq U$, включающая элементы, действительно принадлежащие множеству X , определяется как:

$$XN = \{x \in U \mid [x] \subseteq X\}. \quad (1)$$

Верхняя аппроксимация множества $X \subseteq U$ (рис. 1), включающая элементы, которые возможно принадлежат множеству X , определяется как

$$XV = \{x \in U \mid X \cap [x] \neq \emptyset\}. \quad (2)$$

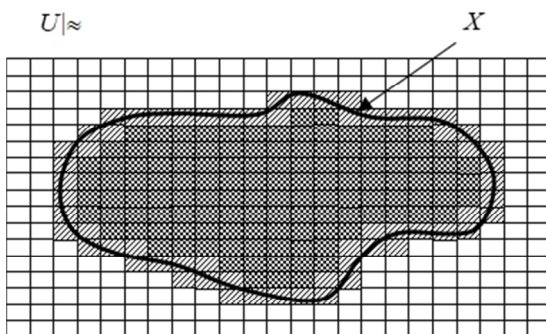


Рис. 1. Аппроксимация приближенного множества X

Разность (1) и (2): $G(X) = XV - XN$ определяет границу множества $X \subseteq U$. Для того чтобы множество X было четким (definable) необходимо, чтобы граница $G(X)$ множества X являлась пустым множеством:

$$X \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} X_V = X_N \Leftrightarrow G(X) = \emptyset. \quad (3)$$

Если множество является не четким, то степень аппроксимации $\beta(X)$ определяется по формуле:

$$\beta(X) = \frac{|X_N|}{|X_V|}, X \neq \emptyset.$$

Если множество является четким, то степень аппроксимации равна единице $\beta(X) = 1$, степень аппроксимации равна нулю, если верхняя аппроксимация равна нулю. На универсуме U можно ввести бинарное отношение неразличимости R . Отношение R эквивалентно отношению

толерантности, являющегося экспликацией сходства или неразличимости. Отношение является отношением толерантности, если оно рефлексивно и симметрично. Отношение R показывает толерантность обрабатываемой администратором сети (главным инженером МБП) информации, представленной в специальных файлах команд или операций, относительно интеллектуального ресурса, представленного в терминологических понятиях имеющегося набора правил. Данное отношение позволяет выполнять операции не с отдельными элементами универсума, а с кластерами толерантных элементов.

Отношение эквивалентности является частным случаем толерантности, если для него кроме рефлексивности и симметричности выполняется еще и транзитивность. Класс эквивалентности $x \in U$, состоящий из объектов, неотличимых от x , в алгебре множеств можно формально определить как $[x] = \{y \in U | x \approx y\}$.

Определяя множество всех классов эквивалентности $U| \approx$, можно получить разбиение универсума U на классы эквивалентности.

Полученные нами приближенные множества операций инженера МБП, содержащих информацию, поступающую в систему для обработки, соответствующих области знаний, можно описать средствами алгебры логики предикатов. Введем на декартовом произведении $D \times D$ универсума U предикат соответствия протоколов выполнения команд персонализированному интеллектуальному ресурсу k -администратора (инженера). Действительно, если $G2(tk1\ tk2) = 1$, то $P(d, tk1) = P(d, tk2)$ для любого документа из области знаний администратора (инженера):

$$G1(d1, d2) = \forall tk \in Tk (P(d1, tk) \sim P(d2, tk)).$$

Введем на декартовом произведении $Tk \times Tk$ универсума U предикат соответствия терминологических понятий персонализированному интеллектуальному ресурсу k -менеджера:

$$G2(tk1\ tk2) = \forall d \in D (P(d, tk1) \sim P(d, tk2)).$$

Предикаты $G1$ и $G2$, определяемые выражениями (1) и (2), рефлексивны, транзитивны и симметричны, из чего следует, что они являются предикатами эквивалентности и однозначно определяются предикатом P .

Анализируя данное направление и его перспективность развития в области МБП можно утверждать о дальнейшем активном развитии исследований и практическом внедрении.

1. Черный С.Г., Жиленков А.А. Идентификация внешних параметров сигналов для экспертных подсистем в составе устройств судовых элект-

троэнергетических систем // НТВ СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 3(198). С. 28–36.

2. Черный С.Г., Доровской В.А. Информационная модель оптимизации нечетких процессов принятия решений (на примере диагностики оборудования добычи полезных ископаемых со дна моря) // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2014. №11. С. 31–36.

3. Жиленков А.А., Железняк А.А., Черный С.Г. Перспективные пути повышения эффективности диагностирования параметров надежности эксплуатации морского бурового оборудования // Вестн. гос. ун-та морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2015. № 1 (29). С. 90–95.

4. Черный С.Г., Жиленков А.А. Интеллектуальная поддержка принятия решений при оптимальном управлении для судовых электроэнергетических систем // Вестн. гос. ун-та морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2014. № 3 (25). С. 68–75.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ВВОДА РЕЖИМА В ДОПУСТИМУЮ ОБЛАСТЬ

С.В. Юферов

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург

В данной статье предложен метод ввода режима электроэнергетической системы, расположенный на границе области существования режима, в область допустимых значений с заданным запасом. Также в статье представлены результаты исследования влияния учета весовых коэффициентов на результирующую корректировку мощностей при использовании Обобщенного метода Ньютона. Исследования проводились на пяти узловой схеме одного класса напряжения.

This paper is provided a method of input the operation point of the electrical power system, located on the existence boundary, in the permissible values range for a given value of the stock. Also the some results of the effect of weighting coefficients accounting for the resulting capacities adjustment using the Newton's method in optimization. The investigations were carried out on a five node test scheme.

Введение

Как было показано в статьях [1, 2] Обобщенный метод Ньютона (ОМН) позволяет скорректировать заданные мощности в узлах таким образом, чтобы несуществующий режим оказался на границе области существования. Как было указано в статьях [2, 3], все узлы рассматриваемой энергосистемы могут быть разделены на 2 типа: активные и пассивные. Активные узлы – узлы, где есть средства регулирования мощностью как активной, так и реактивной, а пассивные узлы, в свою очередь, не имеют средств регулирования ни тем ни другим параметром. Пассивные узлы из рассматриваемой системы исключаются для снижения размерности задачи, но при этом свойства эквивалентной системы, состоящей только из активных узлов, должны соответствовать свойствам исходной системы (процесс получения активного эквивалента в данной работе не рассматривается).

Теоретическая часть

Целевая функция. Минимизируемая целевая функция может быть представлена в следующей форме:

$$F = \sum_{k \in PV + PQ} a_k \cdot \Delta P_k(\delta, V)^2 + \sum_{m \in PQ} b_m \cdot \Delta Q_m(\delta, V)^2, \quad (1)$$

где δ и V – углы и модули напряжений, соответственно; $\Delta P(\delta, V)$ и $\Delta Q(\delta, V)$ – невязки активных и реактивных узловых мощностей; a и b – весовые коэффициенты, с помощью которых можно корректировать траекторию ввода в область существования.

Представленные в (1) весовые коэффициенты могут отражать ряд технических параметров как отдельных устройств, так и их совокупность, например маневренность (скорость сброса/набора мощности) одного генератора или электростанции в целом. В таком случае коэффициенты необходимо выбирать экспертным путем. Другим возможным способом может быть выбор коэффициентов как величина, обратная мощности, заданная в узлах:

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{|P_k|}, k \in PV + PQ; \\ b_m &= \frac{1}{|Q_m|}, m \in PQ. \end{aligned} \quad (2)$$

Сингулярное разложение для корректировки направления. При несовместимости исходных данных после минимизации целевой функции (1) мы получим режим на границе области существования решения. Для выбора направления дальнейшей коррекции узловых мощностей будет использовано сингулярное разложение обратных матриц Якоби и Гессе.

Нормализованный правый вектор будет задавать направление коррекции, поскольку данный вектор соответствует максимальному сингулярному числу. Нормализация элементов вектора проводится отдельно для активных и реактивных мощностей. Знак элементов вектора задается в соответствии со знаком коррекции мощностей узлов, которые были получены при минимизации целевой функции (1).

Результаты исследования на тестовой схеме

Исследования проводились на тестовой схеме, которая представлена на рис. 1. Параметры схемы представлены в табл. 1.

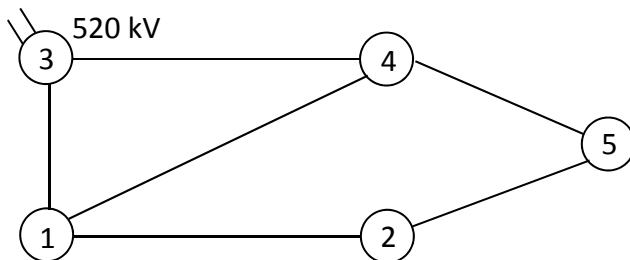


Рис. 1. 5-узловая тестовая схема

Таблица 1

Параметры тестовой схемы и начальные условия

Параметры		Начальные условия			
Ветвь	Z [Ом]	Номер узла	Тип узла	U_{init} [кВ]	S_{init} [МВА]
1–2	$3 + j 40$	1	PQ	500	$-400 + j 200$
1–3	$5 + j 80$	2	PV	500	-8000
1–4	$4 + j 58$	3	Vδ	520	0
2–5	$2 + j 28$	4	PV	500	6000
3–4	$6 + j 79$	5	PQ	500	$700 + j 600$
4–5	$4 + j 35$				

Были рассмотрены три варианта определения весовых коэффициентов. Данные варианты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Весовые коэффициенты

Вариант	a1	a2	a4	a5	b1	b5
1	1	1	1	1	1	1
2	0,0025	0,0001	0,0002	0,0014	0,050	0,017
3	0,0025	0,0001	0,0002	0,0014	1	1

Результаты минимизации целевой функции (1) для всех вариантов весовых коэффициентов представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3 весовые коэффициенты влияют на вектор изменений узловых мощностей. Меньший весовой коэффициент позволяет произвести большую коррекцию параметра. Отсюда следует, что когда все коэффициенты равны единице, то весь небаланс будет распределен по всем параметрам. Второй случай полностью соответствует выражениям (2), где весовые коэффициенты определяются как величины, об-

ратные заданным узловым мощностям. И, как мы видим из данных табл. 3, наибольший дисбаланс возникает в узле 2. В третьем случае коэффициенты при реактивных мощностях узлов 1 и 5 равны единицам, но коэффициенты при активных мощностях определяются как величины, обратную для заданных узловых мощностей. В этом случае мы можем отметить, что изменений реактивных мощностей практически не произошло, и все небалансы были разделены между активными узловыми мощностями. Расчетные узловые напряжения представлены в табл. 4.

Таблица 3

Изменения узловых мощностей при разных весовых коэффициентах

Вариант	$\Delta P1$ [МВт]	$\Delta P2$ [МВт]	$\Delta P4$ [МВт]	$\Delta P5$ [МВт]	$\Delta Q1$ [Мвар]	$\Delta Q5$ [Мвар]
1	-58,91	-135,81	13,72	-58,94	70,621	92,526
2	-5,92	-268,47	20,78	-10,32	3,524	13,899
3	-6,16	-279,52	21,86	-10,73	0,018	0,024

Таблица 4

Узловые напряжения при разных весовых коэффициентах

Вариант	U_1 [кВ]	U_2 [кВ]	U_4 [кВ]	U_5 [кВ]
1	357,59 <u> 32,036°</u>	500,00 <u> 77,731°</u>	500,00 \perp <u>16,527°</u>	320,65 <u> 31,727°</u>
2	356,19 <u> 32,108°</u>	500,00 <u> 76,929°</u>	500,00 \perp <u>16,712°</u>	319,03 <u> 31,609°</u>
3	356,37 <u> 31,993°</u>	500,00 <u> 76,740°</u>	500,00 \perp <u>16,818°</u>	318,56 <u> 31,455°</u>

После притяжения режима на границу области существования возникает потребность ввести его в область допустимых значений с заданным коэффициентом запаса с целью обеспечения стабильности функционирования энергосистемы. В этом исследовании были рассмотрены варианты использования сингулярного разложения обратных матриц Якоби и Гессе при различных весовых коэффициентах, которые представлены выше. Значения нормализованных первых правых сингулярных векторов представлены в табл. 5 и 6 для обратных матриц Якоби и Гессе, соответственно. Элементы вектора обозначены как « R_1 » – « R_6 ». Также в данных таблицах представлено максимальное сингулярное число, оно обозначено как «Sigma».

Таблица 5

Первый правый сингулярный вектор обратной матрицы Якоби

Вариант	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Sigma
1	0,2203	0,5079	0,0513	0,2204	0,4329	0,5671	$1,02 \cdot 10^{15}$
2	0,2224	0,5041	0,0520	0,2216	0,4320	0,5680	$6,10 \cdot 10^{14}$
3	0,2223	0,5041	0,0526	0,2211	0,4308	0,5692	$4,50 \cdot 10^{12}$

Таблица 6

Первый правый сингулярный вектор обратной матрицы Гессе

Вариант	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Sigma
1	0,1559	0,4819	0,2403	0,1220	0,4430	0,5570	0,03
2	0,1634	0,4763	0,2278	0,1325	0,4418	0,5582	120,56
3	0,1637	0,4764	0,2271	0,1328	0,4415	0,5585	115,56

Результаты расчета электрических режимов с корректировкой мощностей для ввода режима в область допустимых значений представлены в табл. 7 и 8. В этих таблицах «Якоб.» означает, что использовался первый правый сингулярный вектор обратной матрицы Якоби для определения направления коррекции узловой мощностей; «Гес.» означает, что он был использован в первый правый сингулярный вектор обратной матрицы Гессе для определения направления коррекции узловой мощности.

Таблица 7

Расчетные мощности при вводе режима в допустимую область

Вариант	SVD	P_1 [МВт]	P_2 [МВт]	P_4 [МВт]	P_5 [МВт]	Q_1 [Мвар]	Q_5 [Мвар]
1	Якоб.	-77,6	-7 256,7	5 924,9	1 022,6	107,3	478,6
	Гес.	-154,7	-7 287,9	5 698,8	904,8	152,0	535,9
2	Якоб.	-130,5	-7 134,1	5 917,6	972,9	223,5	621,2
	Гес.	-200,4	-7 167,0	5 709,2	867,3	224,1	621,1
3	Якоб.	-130,6	-7 123,5	5 915,9	972,5	227,6	636,4
	Гес.	-199,9	-7 156,3	5 709,2	868,0	228,2	635,7

Как можно видеть из таблиц, использование первого правого сингулярного вектора обратной матрицы Гессе обеспечивает большую коррекцию узловых мощностей в тех узлах, где начальные мощности были больше.

Таблица 8

Узловые напряжения после ввода режима в допустимую область

Вариант	SVD	U_1 [кВ]	U_2 [кВ]	U_4 [кВ]	U_5 [кВ]
1	Якоб.	429,05 <u> 16,577°</u>	500,00 <u> 49,009°</u>	500,00 \perp <u>19,174°</u>	397,00 <u> 14,004°</u>
	Гес.	421,02 <u> 20,982°</u>	500,00 <u> 54,916°</u>	500,00 \perp <u>14,733°</u>	391,77 <u> 19,854°</u>
2	Якоб.	423,55 <u> 16,821°</u>	500,00 <u> 49,001°</u>	500,00 \perp <u>19,542°</u>	390,43 <u> 14,087°</u>
	Гес.	419,01 <u> 20,768°</u>	500,00 <u> 54,097°</u>	500,00 \perp <u>15,245°</u>	389,19 <u> 19,390°</u>
3	Якоб.	423,49 <u> 16,747°</u>	500,00 <u> 48,884°</u>	500,00 \perp <u>19,625°</u>	389,88 <u> 13,988°</u>
	Гес.	419,01 <u> 20,662°</u>	500,00 <u> 53,938°</u>	500,00 \perp <u>15,362°</u>	388,66 <u> 19,247°</u>

Выводы

На основе результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1) Использование весовых коэффициентов позволяет учесть характеристики оборудования. Также они позволяют скорректировать траекторию ввода точки режима к границе области существования.

2) Максимальное сингулярное число обратной матрицы Якоби стремится к бесконечности, когда режим находится на границе области существования.

3) Нормализованный правый вектор, полученный в результате сингулярного разложения обратных матриц Якоби и Гессе, может быть использован как направление ввода режима в допустимую область для обеспечения запаса по статической устойчивости.

1. Pazderin A., Yuferev S. Steady-State Calculation of Electrical Power System by the Newton's Method in Optimization: PowerTech. IEEE. 2009. Bucharest, Romania. P. 1–6.

2. Tavlintsev A., Pazderin A., Malozemova O., Chusovitin P. Identification of static polynomial load model based on remote metering systems information. EEEIC. 2013. Wroclaw, Poland. P. 213–216.

3. Yuferev S. Accounting the second derivatives in the power flow calculation // Advanced Materials Research. 2014. V. 960–961. P. 1013–1016.

ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВ

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

М. О. Блинков, О. Г. Блинков

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Статья посвящена основным проблемам развития инновационной деятельности на предприятиях машиностроения. Предложена методика формирования портфеля инновационных решений, реализация которых позволит предприятию преодолеть проблемы и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции.

The article is dedicated to the principal issues of innovation activity development at machine building companies. It considers a method to create a portfolio of innovative solutions, whose implementation would allow the company to solve the issues and increase competitiveness of the company's products.

Научные разработки зарубежных и отечественных исследователей менеджмента убедительно доказывают, что совершенствование какого-либо объекта, разработка любых видов мероприятий по улучшению ситуации должна начинаться с выяснения, опознания и оценки фактического состояния объекта – то есть с процесса диагностики [1, 2]. Учитывая, что в современных условиях хозяйствования одним из основных факторов конкурентоспособности предприятия машиностроения является инновационная деятельность, поставить диагноз для организации, по нашему мнению, значит фактически определить направления ее развития и разработать адекватные организационные изменения, обеспечивающие эффективность ее реализации.

Таким образом, первый шаг диагностики заключается в анализе текущего состояния предприятия, идентификации его основных проблем и их значимости в процессе обеспечения конкурентоспособности предприятия (внутренняя диагностика).

В качестве основных производственных проблем, которые наиболее часто встречаются в деятельности предприятия машиностроения, можно выделить:

- низкий организационный уровень производства и труда, в том числе нарастающие проблемы, связанные с несовершенством организационной структуры управления;
- низкий уровень кооперирования производства;

- низкая применяемость современных информационных технологий как в производстве, так и в организационно-управленческих процессах;
- большой удельный вес подразделений, не вносящих вклад в получение экономического результата деятельности предприятия в целом, то есть затраты на содержание которого превышают результаты и, соответственно, не выгодны;
- нарушение структурности аппарата управления, определяемое через несоответствие количества подразделений нормативно установленным требованиям предприятия, может быть обусловлено болезнями роста компании;
- необоснованная раздутость аппарата управления или чрезмерная перегруженность руководителей.

В качестве основных социально-экологических проблем, которые наиболее часто встречаются в деятельности предприятия, можно выделить:

- низкое качество выпускаемой продукции и как следствие ее неконкурентоспособность и низкий объем продаж;
- низкая квалификация сотрудников, вызывающая как появление несоответствий в производстве, так и увеличение вероятности случаев травматизма;
- слабая эргономичность и, как следствие, нарушение безопасности труда, высокая профзаболеваемость, летальные случаи травматизма;
- значительные отходы производства и выбросы вредных компонентов в атмосферу, воду и почву;
- штрафы на нарушение экологического законодательства.

В качестве основных рыночно-экономических проблем можно выделить следующие:

- высокая зависимость от импорта запасных частей и комплектующих;
- высокая стоимость заемных источников финансирования в условиях дефицита ликвидности на финансовых рынках;
- низкий объем продаж, вызванный низким удельным весом научно-исследовательских разработок, выполняемых на основе маркетинговых исследований;
- высокая себестоимость продукции;
- продукция не соответствует мировым стандартам качества;
- завышение цены продукции при низком ее качестве.

Таким образом, выявление и систематизация существующих проблем предприятия позволяет обозначить конкретные цели реализации инновационных процессов и развития инновационной деятельности

предприятия в целом, то есть определяет целевой подход к формированию портфеля инновационных решений. Это могут быть:

К – повышение качества выпускаемой продукции/повышение качества продукции до мировых стандартов;

Ц – снижение цены продукции при сохранении прежних ее характеристик и свойств;

С – снижение себестоимости выпускаемой продукции за счет развития НИОКР, освоения новых технологий, развития импортозамещения и внедрения новых методов организации труда;

В – увеличение программы производства и объема продаж за счет обновления оборудования и внедрения новых методов маркетинговых исследований;

Р – освоение нового рынка сбыта для старой продукции/новой продукции.

После этого необходимо установить комбинации целей, реализация которых необходима данному предприятию в современных сложных рыночных условиях с учетом выявленных ранее проблемных областей его функционирования. Поэтому второй шаг диагностики, должен заключаться в анализе рыночной ситуации в целом, в том числе требований потребителей, новизны отрасли, уровня конкуренции, развитости рынка инноваций, жизненного цикла выпускаемой продукции и предприятия в целом (внешняя диагностика). Все перечисленные факторы обуславливают определенную комбинацию целей, которые предприятию необходимо достичь для обеспечения своего выживания или конкурентоспособности.

Традиционные комбинации, которые наиболее часто выбирают предприятия в современных условиях хозяйствования, представлены в табл. 1. Индекс 1 в столбце комбинация целей в табл. 1 означает, что никаких изменений не происходит, индекс 2 говорит о необходимости улучшения обозначенного направления деятельности предприятия.

Так, например, первые три комбинации целей не требуют каких-либо инноваций, их достижение возможно за счет рационализации использования внутренних ресурсов, усиления контроля качества, соблюдения технологической дисциплины, сокращения штата работников, осуществляющих некачественную работу либо провоцирующих конфликты в коллективе – это стратегия консерваторов.

Представленные в таблице 1 комбинации целей с 4 по 8 обычно реализуются новаторами или имитаторами. Это более рискованные, но в тоже время более прогрессивные стратегии, имеющие более длительный положительный эффект от их реализации.

Таблица 1

Направления развития производственной деятельности

№	Комбинация целей	Направление развития производственной деятельности
1	$K_1C_1V_1P_1$	Простое производство
2	$K_2C_1V_1P_1$	Производство продукции повышенного качества
3	$K_1C_2V_1P_1$	Производство продукции по сниженной цене для его реализации
4	$K_1C_1C_2V_1P_1$	Производство продукции по ресурсосберегающей технологии
5	$K_2C_1C_1V_2P_2$	Расширенное производство для старых и новых рынков
6	$K_1C_2C_2V_2P_1$	Производство старой продукции по новой технологии
7	$K_1C_1C_2V_2P_2$	Производство старой продукции для старых и новых рынков
8	$K_2C_2C_2V_2P_2$	Расширенное производство новых товаров по новой технологии для старых и новых рынков

Также необходимо отметить, что рынок детерминирует направления инновационной деятельности, предопределяя:

- необходимость использования новых инновационных решений;
- альтернативы при выборе конкретного инновационного процесса;
- сроки реализации инновационного процесса и новшеств на рынке;
- порядок рыночной реализации новшества;
- масштаб распространения новации;
- сроки использования нововведения и замены его новым.

Поэтому далее необходимо определить, какие инновации будут обеспечивать достижение требуемой комбинации целей. В качестве примера приведена матрица, устанавливающая условную зависимость достижения стратегических целей предприятия от реализации конкретных видов инноваций (табл. 2).

При этом вариантов реализации выбранной комбинации целей может быть множество. Например, из таблицы 1 видно, что на качество влияют все виды инноваций, однако степень их воздействия различна. Также необходимо знать сочетаемость одних нововведений с другими, насколько они могут осуществляться на предприятии одновременно и каким образом дополнять друг друга.

Например, внедрение современных интегрированных систем управления, таких как SAP ERP, Baan, BPCS, Oracle и др., позволяет на основе интеграции различных микропроцессов, принимать важнейшие решения в интерактивном режиме (таблица 3).

Таблица 2

Виды инноваций, необходимые для реализации стратегии

Виды инноваций	К	Ц	С	V	P
1. Разработка изобретения и создание продукции на его основе	+		+		+
2. Исследование, разработка новых ресурсосберегающих технологий и создание продукции на его основе			+		
3. Приобретение новых технологий и создание продукции на его основе	+	+	+		
4. Приобретение машин и оборудования	+		+	+	
5. Совершенствование организации производства на основе ноу-хау	+			+	
6. Внедрение новой или совершенствование функционирующей системы менеджмента качества	+		+	+	+
7. Внедрение новых методов обучения персонала	+			+	
8. Внедрение новых методов маркетинговых исследований	+			+	+
9. Внедрение информационных технологий			+	+	

В основе таких систем лежит моделирование быстрых решений в зависимости от рыночной, научно-технической, производственной ситуации, а доступность к базам таких решений, обеспечивает максимальное вовлечение сотрудников в этот процесс. Тогда получаем, что реализация интегрированной системы такого уровня сложности затрагивает не только всю систему менеджмента, но и влечет за собой нововведения в организации труда, затрагивает изменения в технологическом и производственном процессе, позволяя оптимизировать их базовые составляющие, а это в свою очередь обуславливает длительный срок внедрения (при условии установки и организации новых условий деятельности специалистами срок определен как 12 месяцев, при условии самостоятельной настройки и совершенствования деятельности время может быть увеличено до 1–3 лет). Соответственно внедрение средних и крупных интегрированных систем можно определить как корпоративный инновационный процесс среднего уровня сложности, а установку и запуск локальных систем – как простой инновационный процесс, поскольку он затрагивает лишь одну функциональную область деятельности, время на внедрение около недели, адаптация коллектива к такой системе связана с обучением, поэтому общее время – не более месяца.

Таблица 3

Интегрированные системы управления

Параметры	Локальные системы	Малые интегрированные системы	Средние интегрированные системы	Крупные интегрированные системы
Название систем	1С, БЭСТ, ИПОТЕК, Суперменеджер и др.	Concord XAL, Ехact, Парус, Галактика, Эталон и др.	JD Edwards, MFG-Pro, SyteLine и др.	SAP ERP, Baan, BPCS, Oracle и др.
Выполняемые функции	Учетные системы по направлениям	Комплексное управление по функциям	Комплексное управление	Комплексное управление
Сроки внедрения	1–5 дней	Более 4 месяцев	Более 6–9 месяцев	Более 12 месяцев

Таким образом, формируется портфель инновационных решений, представляющий собой рыночно обоснованный перечень видов инновационных процессов различной степени сложности, реализация которых необходима предприятию для выживания или успешного его функционирования в сложных макроэкономических условиях, присущих современной российской экономике.

1. Мескон М. Х., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента / пер. с англ. М.: Дело, 1992, 702 с.

2. Брюс Э., Берчелл Д. Инновации / пер. с англ. М.: Дело и сервис, 2010. 240 с.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАПРАВЛЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

М. О. Блинков, О. Г. Блинков

Уральский федеральный университет г. Екатеринбург

В статье приводится методика оценки направления реализации инновационного процесса на предприятии машиностроения, позволяющая проводить необходимый контроль за ходом реализации инновационного процесса, минимизировать затраты на инновационную деятельность и оптимально корректировать направление инновационного процесса.

The article is dedicated to the method of evaluation of the innovation process at a machine building company, which allows providing required level of control over the progress of the innovation process implementation, minimizing expenses for innovation activities and prompt correcting the direction of the innovation process.

В настоящее время в специализированной научной литературе для оценки функционирования каких бы то ни было механизмов обычно используются показатели, представляющие собой сопоставление результатов деятельности с затратами на ее осуществление, то есть эффективность. И соответственно повышение эффективности предполагает собой получение лучших результатов при меньших или равных затратах. Вместе с тем в ряде научных публикаций высказывается мнение, что, делая оценку, необходимо выделять как эффективность, так и результативность. Так, например, в широко известной работе М. Мескона, М. Альберта и Ф. Хедоури под результативностью понимается способность «делать нужные, правильные вещи», тогда как эффективность означает «умение правильно создавать эти самые вещи» [1]. Применительно к вопросу определения эффективности реализации инновационных процессов в машиностроении, либо любой другой отрасли, данный подход, по нашему мнению, является особенно актуальным. Действительно, получая любую инновацию (в виде новой продукции, технологии, метода управления или организации и т. д.), которая является результатом инновационного процесса, чрезвычайно важно не только с минимальными затратами получить нововведение, но при этом и само нововведение должно быть востребованным, то есть полностью отвечать определенным потребностям как со стороны предприятия, инициирующего его внедрение, так и со стороны рынка, в условиях которого предприятие осуществляет свою деятельность.

Кроме характеристики реализации инновационного процесса с точки зрения результативности и экономичности при оценке эффективности управления им, необходимо учитывать такой важный фактор, как время [2], то есть за какой промежуток времени мы достигаем поставленной цели. Если проводимая инновационная деятельность будет и необходимо востребованной, и достаточно экономичной, но в целом процесс получения этих инноваций будет более длителен по сравнению со средней продолжительностью инновационных процессов на аналогичных предприятиях, то очевидно, что эффективность функционирования организационно-экономических механизмов реализации инновационных процессов на данном предприятии или организации будет ниже, чем на предприятиях, получающих аналогичные результаты, но в более короткие сроки.

Таким образом, оценку функционирования организационно-экономического механизма (ОЭМ) реализации инновационных процессов нужно проводить, выделяя в качестве основных три критерия:

- результативность, то есть способность получать в результате инновационных процессов инновации, способствующие достижению поставленных целей;
- экономичность, то есть способность получать необходимые инновации при допустимом уровне затрат;
- время, иными словами способность получать необходимые результаты за определенный промежуток времени.

При этом осуществлять указанную оценку функционирования организационно-экономического механизма мы предлагаем в три этапа:

1. Оценить результативность инновационного процесса, реализуемого на предприятии.
2. Оценить применение на практике методологических принципов организационно-экономического механизма реализации инновационных процессов.
3. Оценить эффекты инновационной деятельности на базе интегрированных показателей, получаемых на первом и втором этапах.

Кроме того, необходимо отметить, что при выборе показателей оценки функционирования ОЭМ учитывались следующие особенности информации:

- *объективность и контролируемость.* Следует использовать такие показатели, значения которых можно сравнивать со значениями предыдущих периодов. Следует минимизировать случаи переопределения показателей с течением времени. Способ сбора и обработки исходной информации должен допускать возможность проверки точности полученных данных в процессе независимого мониторинга;

- *адекватность отражения происходящих изменений.* Показатели должны служить надежной базой для оценки результативности инноваций. Данные должны быть достаточно точными для целей их использования и поступать регулярно (то есть со строго определенной периодичностью) и своевременно;
- *экономичность.* Возможность получить необходимые данные, не выходя за экономически обоснованные пределы затрат. Показатель должен опираться на уже имеющуюся в наличии информацию;
- *соответствие поставленной цели (релевантность).* Каждый отдельный показатель должен быть нацелен на измерение прогресса в решении определенной задачи;
- *точность и недвусмысленность.* Выбор показателей следует осуществлять исходя из необходимости непрерывного накопления данных и обеспечения их сопоставимости за отдельные периоды времени. Суть показателя должна быть ясна как сотрудникам рабочей группы, осуществляющей расчет, так и руководителям подразделений.

На наш взгляд, оценку результативности инновационного процесса необходимо проводить в трех аспектах: организационно-управленческом, социальном и производственном.

1. Организационно-управленческая результативность отражает степень оптимизации иерархичности производственной системы, уровень соотношений в ней связей координации и субординации, возможности реализации организационного потенциала и получении максимальной отдачи от управленческих мероприятий. Интегрированным показателем, определяющим организационную результативность инновационного процесса, является (*OR*):

$$OR = \sqrt[3]{T_{dep} * T_{sm} * T_m}, \quad (1)$$

где T_{dep} – коэффициент рентабельных подразделений;

T_{sm} – структурность аппарата управления;

T_m – управляемость аппарата управления.

Коэффициент рентабельных подразделений, то есть непосредственно участвующих в жизненном цикле продукции и вносящих существенный вклад в получаемый экономический результат деятельности предприятия:

$$T_{dep} = K_{department} / \Pi_{\phi}, \quad (2)$$

где $K_{department}$ – число рентабельных подразделений;

Π_{ϕ} – фактическое число подразделений.

Структурность аппарата управления:

$$T_{sm} = \sum (P_n * Q_n) / \sum (P_\phi * Q_\phi), \quad (3)$$

где P_n – нормативное число структурных подразделений;

Q_n – нормативная численность работников аппарата управления;

Q_ϕ – фактическая численность работников аппарата управления.

Управляемость аппарата управления:

$$T_m = \frac{1}{Z} * \sum_i \frac{H_{\phi i}}{H_{ni}}, \quad (4)$$

где $i = 1, \dots, Z$ – число уровней управления;

$H_{\phi i}$ и H_{ni} – фактическое и нормативное число работников, приходящееся в среднем на одного руководителя i -го уровня управления.

2. *Социальная результативность* инновационного процесса отражает потребительскую и социальную значимость для общества и отдельных индивидуумов при потреблении созданных новых или улучшенных материальных продуктов. Интегрированным показателем, определяющим социальную результативность инновационного процесса, является (SR):

$$SR = \sqrt[2]{K_{quality} * K_{ecology}}, \quad (5)$$

где $K_{quality}$ – коэффициент качества (определяется по показателям подразделения);

$K_{ecology}$ – коэффициент экологической безопасности производственной деятельности (определяется по показателям подразделения).

3. *Производственная результативность* отражает повышение уровня производственно-технологической деятельности предприятия и качества выполнения работ его сотрудниками. Интегрированным показателем, определяющим производственную результативность инновационного процесса является (PR):

$$PR = \sqrt[4]{(T_{авт} * T_{тех.прог} * T_{произв.}) / (T_{дефект} * T_{ритм})}, \quad (6)$$

где $T_{авт}$ – уровень механизации и автоматизации выполнения технологических операций;
 $T_{тех.прог}$ – уровень технологической прогрессивности;
 $T_{произв}$ – производительность;
 T_{defect} – потери от брака к объему выпущенной продукции;
 $T_{ритм}$ – ритмичность производства.

Уровень механизации и автоматизации выполнения технологических операций:

$$T_{авт} = Q_{авт} / Q, \quad (7)$$

где $Q_{авт}$ – количество рабочих, выполняющих технологические операции при помощи машин и по наблюдению за автоматами, чел.;
 Q – численность рабочих, участвующих в технологических процессах, чел.

Уровень технологической прогрессивности:

$$T_{тех.прог} = Q_{тех.прог} / Q_{техн}, \quad (8)$$

где $Q_{тех.прог}$ – число новых и усовершенствованных технологических процессов, шт.
 $Q_{техн}$ – общее количество технологических процессов в соответствии с технологической документацией предприятия, шт.

Производительность:

$$T_{произв} = Q_{volume_ф} / T, \quad (9)$$

где $Q_{volume_ф}$ – фактический объем выпущенной товарной продукции, руб.;
 T – временной период, часы.

Потери от брака к объему выпущенной продукции:

$$T_{defect} = C_{defect} / Q_{volume_ф}, \quad (10)$$

где C_{defect} – потери от брака за период, руб.

Ритмичность производства – фактический объем товарной продукции, выпущенной за первую декаду, руб./часы.

Предлагаемая система интегрированных показателей отражает результативность внедрения нововведения, а ее применение будет способ-

ствовать выбору направления дальнейших организационных преобразований, связанных с данным нововведением и развитием инновационной управленческой стратегии предприятия в целом.

После формирования многоаспектной системы показателей для непосредственной оценки результативности инновационного процесса мы предлагаем использовать графический метод. На осях откладываются индексы интегрированных показателей (периодичность исследования одна и та же – месяц, квартал, полугодие), отражающих организационно-управленческую, социальную и производственную результативность инновационного процесса, затем находится центр тяжести треугольника, который отражает интегрированный результат исследуемого инновационного процесса и наглядно иллюстрирует, какие показатели в большей степени отреагировали. Тогда, оценка результативности инновационного процесса сводится к отслеживанию динамики движения этой активной точки и анализу ее нового положения.

Таким образом, разработанная методика оценки результативности внедрения инноваций позволяет оперативно отслеживать направление развития инновации и способствует оптимальному выбору направления дальнейших организационных преобразований, связанных как с данным нововведением, так и с развитием инновационной управленческой стратегии предприятия в целом. Методика применима как в ходе реализации нововведения на любой фазе как базовый элемент контроля, так и для оценки итоговой результативности инновационного процесса.

1. Мескон М. Х., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента : пер. с англ. – М.: Дело, 1992. 702 с.

2. Герасимов А. Е. Проблемы повышения эффективности инновационной деятельности // Инновации. 2001. № 9.

МАЛОЕ ИННОВАЦИОННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОСТИ ЭКОНОМИКИ

И. В. Ершова, О. О. Подоляк, П. В. Мезенцев
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Инновационное развитие уже давно стало залогом существования и развития промышленного предприятия. Целью исследования является выявление проблемных элементов процесса инновационного развития промышленных предприятий, механизма создания и внедрения инноваций, а также поиск путей повышения эффективности процесса внедрения инноваций. В статье рассматривается малое инновационное предприятие как один из инструментов повышения эффективности инновационной деятельности промышленных предприятий.

Innovative development became a pledge of the industrial enterprise existence and development for a long time. A research objective is identification of innovative process problem elements of the industrial enterprises development, the mechanism of creation and introduction of innovations, and also search of ways of efficiency increase of the innovations introduction process. In article the small innovative enterprise as one of instruments for efficiency increase of the industrial enterprises innovative activity is considered.

Только инновационный рынок позволит нашей стране преодолеть наследие «разрухи 90-х» и обеспечит «государственный суверенитет» за счет создания инновационной базы для дальнейшего успешного развития всей народно-хозяйственной системы. Инновации необходимы в первую очередь предприятиям, производящим сложную промышленную продукцию. Несмотря на всеобщее понимание необходимости инновационного развития как экономики в целом, так и отдельных предприятий, а также активное государственное финансирование разного рода и уровня инновационных проектов, заметного роста инновационной активности не наблюдается. Для обеспечения инновационного развития в разное время предлагались такие структурно-организационные формы, как технопарки, промышленные технопарки, кластеры технополисы. Одним из инструментов преодоления кризиса инновационного развития является создание малых инновационных предприятий (МИП) при вузах.

В 2009 году появился Федеральный закон 02.08.2009 № 217-ФЗ [4], разрешающий вузам и НИИ создавать малые инновационные предприятия. Как показал анализ статистических данных, в 2012 году малых инновационных предприятий (МИПов) в рамках инновационной структуры УрФУ было создано более 60 [5], к настоящему моменту таких предприятий более 80, но интенсивного роста инновационности промышленности в городе Екатеринбурге или в Уральском регионе не последовало. Созданные инновационные предприятия не дали мультипликативного эффекта прироста объема инновационной продукции. Причин данной ситуации много, но, по нашему мнению, одной из них может быть некорректное отнесение созданных предприятий к МИПам или некорректное определение их целевой установки.

Термин «малое инновационное предприятие» не является новым, так, например, данный термин используется в Федеральном законе от 24 июля 2007 года № 209-ФЗ «О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации» [1], а также в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года [2]. Р. Б. Михайлов [3], рассмотрев понятие «малое инновационное предприятие» в законодательных источниках, отмечает наличие серьезных отличий в его трактовке и целевых установках.

Необходимо провести исследование теоретических и практических основ понятия «малое инновационное предприятие при вузах», сформировать классификационные признаки выделения МИП при вузах, обозначить их целевое предназначение, тем самым обеспечить эффективность и результативность их функционирования.

Для оценки роли и значения МИП как элемента инновационного пространства в сравнении с иными организационно-структурными формами составлена сравнительная таблица.

Как видно из представленного материала, МИП принципиально отличается от других форм инновационного предпринимательства обязательным присутствием научной организации в роли учредителя. Анализируя все остальные параметры сравнения, мы можем говорить только о временном лаге (МИП появились сравнительно недавно по сравнению с остальными формами инновационной активности) и более проработанной нормативно-правовой базой функционирования. По своей сути МИП пришел на смену не ставшим эффективными технопаркам, технополисам, кластерам. При этом формально цели всех форм предприятий и объединений, рассмотренных в анализе, весьма схожи – коммерциализация инноваций, обеспечение взаимодействия науки и научных со-

трудников (как источника инноваций) и промышленности (как объекта реализации инноваций).

Подобная ситуация уже была пройдена российской экономической системой, когда под вывеску «технопарк» собирались далеко не инновационные предприятия. Технопарки, технополисы, кластеры – это, скорее, оболочки (надстройки), в рамках которых предполагается наличие предприятий, ориентированных на создание инноваций. Причем этим «оболочкам» предоставляются налоговые и иные льготы. Поэтому считаем необходимым уточнить понятие термина «малое инновационное предприятие».

На основе сделанных выводов мы можем говорить о постепенном формировании эффективной системы передачи результатов научных исследований в реальный сектор экономики, что на данный момент является залогом выживания многих промышленных предприятий.

Основное отличие МИП от других инновационных структур состоит в том, что речь идет не об оболочке, а о «рабочей лошадке», создающей инновации – резиденте «оболочки».

Возникает вопрос: в каком случае МИП будет удачнее остальных форм инновационного предпринимательства?

Очевидно, что в инновационной структуре вуза следует предусмотреть два базовых элемента: первый элемент – создающий инновации, состоящий из ученых; второй элемент – интерфейсный, работающий со внешней средой (заказчиком, надзорными и регулирующими органами). В таком случае будет разведена работа по созданию инноваций и обеспечению их жизнеспособности. Цель первого, «создающего», элемента – формирование продукта. Цель второго, «интерфейсного», элемента – обеспечение функционирования малых инновационных предприятий (выявление спроса внешней среды, обеспечение коммерциализации инноваций, обеспечение деловой инфраструктуры работы МИП).

Малые инновационные предприятия сами по себе не могут выполнить задачу трансфера инноваций, мы считаем, что необходимо сформировать институт инновационной инфраструктуры, которая будет обеспечивать эффективность функционирования МИПов.

Таблица 1

Сравнительный анализ форм инновационного развития

Отличительные признаки	Технопарк	Промышленный технопарк (округ, зона)	Кластер и технологический ареал	Технополис	Малое инновационное предприятие (МИП)
Экономическое содержание	Соединение идей и изобретений с капиталом и предпринимателями, привлечение общественных и частных фондов для обеспечения стартового периода внедренческих компаний.	Концентрация специальных поставщиков, в основном из малого и среднего бизнеса, вокруг крупного предприятия, выстраивающих постоянный цикл производства и услуг	Группа географически соседствующих компаний и организаций, связанных общей средой деятельности и взаимодополняющих друг друга, делящих общую инфраструктуру	Разновидность свободной экономической зоны в рамках территориально-обобщенного округа со своими принципами организации деятельности промышленности	Коммерциализация инновационных идей и решений, появившихся в вузах и НИИ
Функции	Стимулирование перехода от экспериментального производства к коммерческому освоению новой продукции, технологии	Развитие малого и среднего бизнеса, увеличение числа рабочих мест на основе внедрения достижений мировой и отечественной науки и техники в высокотехнологичных отраслях	Развитие новых целостных производственно-хозяйственных систем. Создание, внедрение и распространение технологий, производство и сбыт продукции	Соединение научных исследований в передовых отраслях с наукоемким промышленным производством	Доведение инновационных разработок до реализации

Отличительные признаки	Технопарк	Промышленный технопарк (округ, зона)	Кластер и технологический ареал	Технополис	Малое инновационное предприятие (МИП)
Участники и условия их взаимодействия	Производственные, научные, инфраструктурные предприятия. Расположены компактно	Промышленные предприятия, развитая техническая и социальная инфраструктура сконцентрированы на обособленной территории	Комплекс взаимодополняющих друг друга компаний (производственные, научные, исследовательские, инфраструктурные), работающих согласованно	Может включать обучающие организации, исследовательские лаборатории, опытное производство (массового производства нет), предприятия инфраструктуры (производственной, социальной)	Работники вуза или НИИ
Учредители	Инновационные предприятия, ВУЗы, федеральные и региональные органы государственной власти	Нет	Нет	Несколько учредителей, в т. ч. от органов государственной власти и управления, науки и производства	Вузы, НИИ, ученые

Отличительные признаки	Технопарк	Промышленный технопарк (округ, зона)	Кластер и технологический ареал	Технополис	Малое инновационное предприятие (МИП)
Цель	Коммерциализация исследований	Усиление конкурентных преимуществ конкретной продукции каждого предприятия-участника	Повышение конкурентоспособности участников за счет внедрения новых технологий и снижения затрат	Становление фундаментальных исследований с последующей коммерциализацией результатов научных изысканий	Практическое применение (внедрении) результатов интеллектуальной деятельности, исключительные права на которые принадлежат данным научным учреждениям
Роль государства	Обязательная государственная поддержка в виде прямых инвестиций в развитие инфраструктуры и прочие проекты, налоговых льгот, лоббирования интересов				Не прописана
Экономическая база развития	Экономия на инфраструктуре управления, телекоммуникаций, инженерных и информационных служб, юридическом сопровождении	Экономия на создании новых инфраструктурных объектов, транспортировке продукции	Снижение затрат на внедрение новых технологий за счет эффекта масштаба	Местные налоги и взносы предприятий-участников	Возможность использовать инфраструктуру университета или НИИ
Нормативная база	Законодательно не закреплено. Есть упоминание в ФЗ24.07.2007 № 209-ФЗ статья 15 [6]		Деятельность определена ФЗ 22.07.2005 № 116-ФЗ [7]	Законодательно не закреплено.	Федеральный закон 02.08.2009 № 217-ФЗ [4]

-
1. О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации: закон Российской Федерации // Собрание законодательства РФ. 30.07.2007. № 31. ст. 4006.
 2. О Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года: распоряжение Правительства Российской Федерации // Собрание законодательства РФ. 24.11.2008. № 47, ст. 5489.
 3. Михайлов Р. Б. Малое инновационное предприятие в России: некоторые особенности сущности понятия и содержания // Проблемы и перспективы современной науки : сб. материалов I Международ. науч.-практ. конф. Ставрополь, 2014. С. 292–296.
 4. Федеральный закон 02.08.2009 N 217-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам создания бюджетными научными и образовательными учреждениями хозяйственных обществ в целях практического применения (внедрения) результатов интеллектуальной деятельности».
 5. Инновационная инфраструктура Уральского федерального университета. URL: <http://www.inno.urfu.ru/>
 6. Федеральный закон от 24.07.2007 № 209-ФЗ (ред. от 28.12.2013) «О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.07.2014). Ст. 15. Инфраструктура поддержки субъектов малого и среднего предпринимательства
 7. Федеральный закон от 22.07.2005 № 116-ФЗ (ред. от 23.07.2013) «Об особых экономических зонах в Российской Федерации»

ДОХОДНОСТЬ И РИСКИ ОТРАСЛЕЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА РФ

А. В. Ключев, Ю. В. Фахретдинова

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

В процессе перехода к рыночной экономике машиностроительный комплекс России претерпел значительные изменения. В качестве одного из способов сохранения конкурентоспособности предприятия на современном этапе развития является диверсификация. В статье рассмотрены результаты анализа деятельности российских машиностроительных предприятий в разрезе отраслей. На основании этой выборки выделен оптимальный размер производства, определена степень риска неполучения дохода в различных отраслях машиностроения.

In the course of transition to market economy the machine-building complex of Russia underwent considerable changes. As one of ways of preservation of competitiveness of the enterprise at the present stage of development diversification is. In article results of the analysis of activity of the Russian machine-building enterprises in a section of branches are considered. On the basis of this selection the optimum amount of production is allocated, degree of risk of non receipt of the income in various branches of mechanical engineering is defined.

В современном мире любое предприятие сталкивается с огромным давлением со стороны рынка. Выдержать эту борьбу могут лишь те организации, которые ведут свою деятельность наиболее эффективным способом, добиваясь сокращения издержек при сохранении высокого качества товаров и услуг.

В период командной экономики осуществлялось централизованное управление предприятиями. Предприятия владели полным циклом производств, включая вспомогательные и обслуживающие производства. Переход к рыночной экономике ознаменован институциональными преобразованиями в промышленности, которые привели к росту числа машиностроительных предприятий. Однако в наши дни в ряде случаев наблюдается обратная картина: предприятия снова предпочитают укрупняться. Большинство предприятий стремится к уменьшению влияния рисков и повышению эффективности путем диверсификации своей деятельности.

Определим диверсификацию следующим образом: стратегическое решение, заключающееся в использовании предприятием принципиаль-

но новых направлений деятельности и распределения ресурсов в рамках организационной формы.

В таком случае перед собственником встает вопрос: «Как выбрать подходящую область деятельности, способную принести наибольшую выгоду?» С целью ответа на этот вопрос в статье были проанализированы показатели работы машиностроительных предприятий РФ.

Машиностроение играет особую инфраструктурную роль, удовлетворяя потребности других отраслей в станках, оборудовании, приборах и т. д. Поэтому изучение способов повышения доходности машиностроительных предприятий является чрезвычайно актуальной проблемой.

Машиностроение в России

Переход к рыночной экономике ухудшил показатели экономической эффективности промышленных предприятий. Это ухудшение объясняется расчленением большого количества промышленных предприятий. Преобразования приводят к десятикратному росту числа предприятий (таблица 1).

Таблица 1

Число предприятий машиностроения в РФ (на конец года) [1]

До 1990-х гг. – командная экономика, зарождение рыночных отношений	1991+1997 гг. – передел собственности, массовый раздел предприятий	1998+2005 гг. – поглощения, присоединения, банкротства предприятий	2006+2011 гг. – восстановление потенциала отрасли, осложнение финансовым кризисом
5 252	58 366	22 842	25 928

Однако рост числа предприятий вскоре сменяется их сокращением. Одни компании не выдерживают конкуренции и самостоятельной, не контролируемой государством, деятельности. Другие целенаправленно начинают укрупнение путем создания различных корпораций, холдингов и т. д. Примерами таких преобразований могут служить объединения на уровне регионов (группа компаний «Финмпромко», «Синара», «Юнако») или на уровне всей страны (Ростехнологии, Объединенные машиностроительные заводы и т. д.).

Основными целями диверсификации деятельности предприятия по-прежнему являются минимизация рисков и потерь дохода и повышение эффективности работы предприятия. Какие же предприятия будут представлять интерес для диверсификации деятельности головной компании?

С этой целью была проанализирована выборка из 2742 машиностроительных предприятий различных отраслей. В качестве показателей оценки были выбраны объем и рентабельность продаж. В данном случае объем продаж позволит сделать вывод об устойчивости и мобильности предприятия на рынке, а рентабельность – об эффективной работе компании. Результаты анализа приведены на рисунке 1.

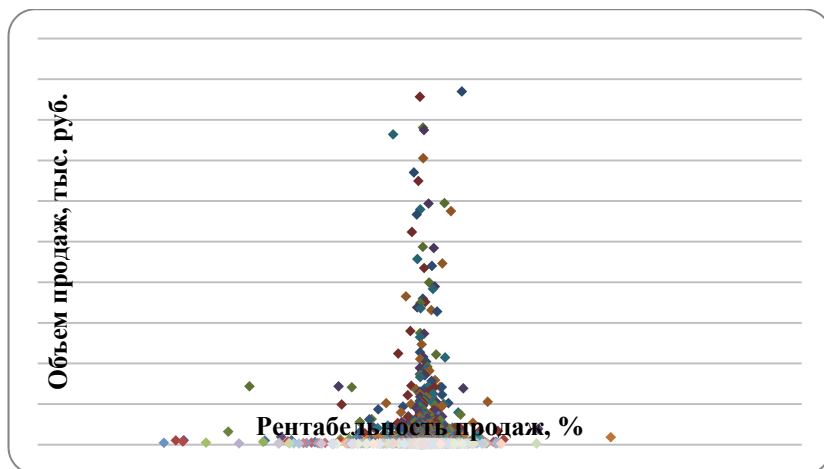


Рис. 1. Распределение машиностроительных предприятий по уровню рентабельности продаж [2]

Анализ показал, что наибольшее количество предприятий имеет рентабельность продаж на уровне до 0,5 % при объеме продаж до 5 млрд руб. При этом большая часть предприятий все же имеет положительное значение рентабельности. Стоит отметить, что некоторая часть предприятий имеет тот уже уровень рентабельности при больших объемах производства.

Целесообразно ли увеличивать долю рынка, если не наблюдается роста эффективности? Возможно, собственникам стоит задуматься о вложении средств в другие направления деятельности вместо наращивания объемов производства. Однако реализация новых направлений является достаточно рискованным мероприятием.

На современном этапе развития экономики диверсификация становится распространенным инструментом повышения эффективности работы предприятия. При этом в некоторых случаях диверсификация охватывает совершенно разные по виду деятельности направления. Ярким примером может служить группа компаний «Синара», сочетающая

в своей деятельности строительство, металлургию, машиностроение и даже банковское обслуживание. Такое сочетание способно уменьшить влияние общих рисков, т. к. спад в одной отрасли может быть скомпенсирован подъемом в другой. Существуют также примеры однонаправленных холдингов. Например, «Объединенные машиностроительные заводы» или «Синара – Транспортные машины» занимаются только оптовой торговлей машин и оборудования, производимых в дочерних компаниях.

При выборе направления диверсификации необходимо учитывать некоторые условия:

- 1) чем больше риск, тем выше доходность;
- 2) необходимость учета действующих направлений работы предприятия;
- 3) желательное расхождение периодов спада и подъема в рассматриваемой и текущей отраслях производств предприятия.

Таким образом, главным критерием принятия решения о необходимости диверсификации и о выборе направлений диверсификации является соотношение доходности и риска. С целью оценки рискованности отраслей машиностроения России была проанализирована описанная выше выборка предприятий в разрезе отраслей. По предприятиям каждой отрасли были выделены максимальные и минимальные значения рентабельности продаж, рассчитан средневзвешенный уровень рентабельности продаж по отрасли. В качестве меры волатильности показателя эффективности было рассмотренное среднеквадратическое отклонение рентабельности продаж. Результаты данного анализа приведены в таблице 2.

Согласно полученным данным наблюдаются очень большие разрывы между максимальными и минимальными значениями показателя. Так, например, в производстве станков наименьшее значение рентабельности составляет – 977,60 %, а наибольшее – 16,54 %. В свою очередь, в производстве механического оборудования максимальное значение рентабельности равно 100,00 %, а минимальное значение составляет 221,33 %. Данный разброс значений показателя рентабельности продаж говорит о достаточно высокой рискованности отрасли. Наибольшее количество отраслей имеет разброс значений рентабельности от 10 % до 20 %. Это может говорить о том, что большинство отраслей машиностроительных производств являются рискованными.

Лишь три отрасли имеют отклонение от среднего уровня меньше 10 %: «Производство изделий медицинской техники, средств измерений, оптических приборов и аппаратуры, часов» (7,37 %), «Производство промышленного холодильного и вентиляционного оборудования»

(6,72 %), «Производство электродвигателей, генераторов и трансформаторов» (8,91 %). Необходимо отметить, что более стабильными являются отрасли, производящие продукцию, используемую не только в промышленности, но и в повседневной жизни человека.

Таблица 2

Анализ отклонений рентабельности продаж в разрезе отраслей [2]

Код ОКВЭД	Формулировка кода ОКВЭД	Кол-во предприятий	Рентабельность продаж, %			Среднеквадратическое отклонение, %
			минимум	средняя взвешенная	максимум	
29.1	Производство механического оборудования	375	-221,33	6,11	100,00	18,33
33	Производство изделий медицинской техники, средств измерений, оптических приборов и аппаратуры, часов	237	-18,98	5,27	39,76	7,37
29.22	Производство подъемно-транспортного оборудования	205	-68,07	4,85	214,17	18,07
31.2	Производство электрической распределительной и регулирующей аппаратуры	295	-111,93	4,63	62,01	12,02
29.23	Производство промышленного холодильного и вентиляционного оборудования	203	-38,31	3,38	42,65	6,72

Код ОКВЭД	Формулировка кода ОКВЭД	Кол-во предприятий	Рентабельность продаж, %			Среднеквадратическое отклонение, %
			минимум	средняя взвешенная	максимум	
31.1	Производство электродвигателей, генераторов и трансформаторов	150	-36,83	3,13	30,14	8,91
35	Производство судов, летательных и космических аппаратов и прочих транспортных средств	186	-124,04	1,54	35,10	15,38
34	Производство автомобилей, прицепов и полуприцепов	489	-123,58	0,65	61,15	14,03
29.5	Производство прочих машин и оборудования специального назначения	418	-68,51	-0,14	43,91	11,15
29.3	Производство машин и оборудования для сельского и лесного хозяйства	97	-127,71	-0,71	24,27	17,69
29.4	Производство станков	87	-977,60	-8,40	16,54	105,75

Каким же образом стоит реализовать диверсификацию, чтобы увеличить доходность предприятия и уменьшить влияние рисков? Как правило, на принятие решения о диверсификации влияет оценка не всей отрасли в целом, а конкретного предприятия. Анализируется его положение на рынке, уровень конкурентоспособности, показатели эффективности, производственные возможности. Однако упускается из виду влияние самой отрасли на деятельность организации. Таким образом,

помимо стандартной оценки предприятия можно оценивать сочетание направлений по уровню риска. Например, если отрасль, в которой на данный момент функционирует предприятие, имеет незначительную степень риска, то оно может позволить себе диверсифицироваться в более рискованную отрасль. Сочетание же двух наиболее рискованных направлений может привести к серьезным убыткам.

Выводы

Анализ действующих предприятий машиностроительных отраслей показал, что основная часть предприятий имеет объемы производства до 10 млрд руб. и рентабельность от -0,5 % до 0,5 %. Анализ показателей рентабельности предприятий в разрезе отраслей показала, что практически все рассмотренные отрасли соответствуют степени риска до 20 %. Данные результаты позволяют поставить вопрос: выгоднее наращивать объемы производства, сохраняя тот же уровень рентабельности, или диверсифицировать свою деятельность. Для успешного использования диверсификации в первую очередь необходимо провести анализ уровня риска отрасли, в которой уже работает предприятие, и отрасли, в которую собирается войти организация.

1. Конкурентоспособность социально-экономических систем: вызовы нового времени // под ред. А. И. Татарина. М.: Экономика, 2014.

2. Информационно-аналитическая система FIRA-PRO [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pro.fira.ru>. Для доступа к информ. ресурсам требуется авторизация.

ВЛИЯНИЕ РИСК-ФАКТОРОВ НА ДОХОДНОСТЬ ИПОТЕЧНЫХ ДЕРИВАТИВОВ

К. А. Кошелев, В. А. Боровкова

Санкт-Петербургский государственный торгово-экономический
университет, Санкт-Петербург

В данной статье рассмотрена нормативно-правовая база, регламентирующая выпуск и обращение ипотечных деривативов, поэтапно описан процесс создания дериватива и проверена гипотеза относительно влияния риск-факторов на доходность ипотечных деривативов, на основе которой разработаны рекомендации относительно управления деривативами.

In this article considered legal aspects of derivatives, described the regulatory framework governing the issuance and circulation of mortgage derivatives, described the process of creating derivatives and tested a hypothesis regarding the impact of risk factors on the yield of mortgage derivatives. Due to these recommendations, developed recommendations for the management of mortgage derivatives.

В каждой стране с развитой экономической системой рынок производных инструментов является самым крупным сегментом всего финансового рынка. Среди большого количества финансовых инструментов, находящихся на биржевом и внебиржевом фондовых рынках можно выделить группу производных финансовых инструментов – деривативов.

В соответствии со ст. 2 Закона РФ № 39 «О рынке ценных бумаг» от 22 апреля 1996 г. производный финансовый инструмент – это договор, за исключением договора репо, предусматривающий одну или несколько из следующих обязанностей:

- 1) обязанность сторон или стороны договора периодически или единовременно уплачивать денежные суммы;
- 2) обязанность сторон или стороны на условиях, определенных при заключении договора, в случае предъявления требования другой стороной купить или продать ценные бумаги, валюту или товар либо заключить договор, являющийся производным финансовым инструментом;
- 3) обязанность одной стороны – передать ценные бумаги, валюту или товар в собственность другой стороне не ранее третьего дня после дня заключения договора, обязанность другой стороны – принять

и оплатить указанное имущество и указание на то, что такой договор является производным финансовым инструментом [1].

Виды деривативов представлены в Указании ЦБ РФ от 16 февраля 2015 г. № 3565-У «О видах производных финансовых инструментов», на которое ссылаются в пункте 2 ст. 44 ФЗ № 39 «О рынке ценных бумаг» [1].

Ипотечные ценные бумаги как деривативы официально появились на российском рынке после выхода Федерального закона от 11 ноября 2003 г. № 152-ФЗ «Об ипотечных ценных бумагах» и на данный момент представлены облигациями с ипотечным покрытием и ипотечными сертификатами участия. В ст. 2 вышеуказанного ФЗ ипотечный сертификат участия рассматривается как ценная бумага, удостоверяющая долю ее владельца в праве общей собственности на ипотечное покрытие, право требовать от выдавшего ее лица надлежащего доверительного управления ипотечным покрытием и право на получение денежных средств. Облигации с ипотечным покрытием представляют собой ценные бумаги, исполнение обязательств по которым обеспечивается полностью или в части залогом ипотечного покрытия [2]. Два вышеуказанных понятия имеют отличия по различным характеристикам, таким как возможность транширования, стоимость выпуска, риски по пулу и другие.

По мнению экономиста Жака Лорана, деривативы разделены в соответствии с основными особенностями хеджирования на три больших класса: линейных синтетических ценных бумаг (корзина активов, спрэд); зависящих от времени безусловных деривативов (линейные, квазилинейные и нелинейные) и нелинейных требований, зависящих от обстоятельств (опционы и ипотечные деривативы) [3, с. 54–55].

Вышеуказанную классификацию деривативов, несмотря на грамотность и огромный спектр примененных финансовых инструментов, нельзя назвать полной, принимая во внимание недостаточность критериев, которые были выбраны для классификации. Поэтому, учитывая научные подходы отечественных ученых В. В. Гоффа и А. Н. Буренина, а также рассмотренную выше классификацию, можно выделить основные классификационные признаки для данного производного финансового инструмента (рис. 2):

- 1) базовый актив, положенный в основу соглашения (товарные, валютные, фондовые, кредитные деривативы);
- 2) место совершения сделки (биржевые и внебиржевые деривативы);
- 3) цель совершения сделки (спекулятивные, арбитражные деривативы, деривативы хеджирования);

4) срок исполнения сделки (кратко-, долго- и среднесрочные деривативы), обязательность выполнения условий соглашения (твердые, условные сделки).

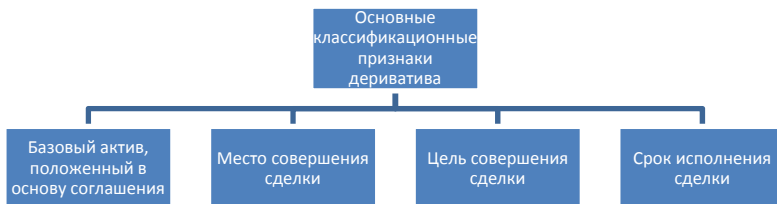


Рис. 1. Классификация деривативов

В настоящем исследовании под «ипотечным деривативом» (ИД) понимается ценная бумага с возможностью эмиссии, полученная в результате секьюритизации – процедуры трансформации низколиквидных активов в ликвидные ценные бумаги, платежи по которым обеспечены потоком от пула лежащих в их основе активов (ипотечных кредитов) [5, с. 89–90].

ИД – это относительно новый для финансовой системы России инструмент, вызывающий интерес у финансовых институтов из-за возможности повышения ликвидности баланса и в качестве одного из направлений предоставления финансовых услуг.

Процесс создания ипотечного дериватива можно разделить на пять этапов [3, с. 127–130]: продажа объединения активов, выпуск ипотечных деривативов, оплата за объединение активов, сбор средств от объединения активов и осуществление выплат инвесторам (рис. 2). На каждом этапе используются свои методы управления рисками.

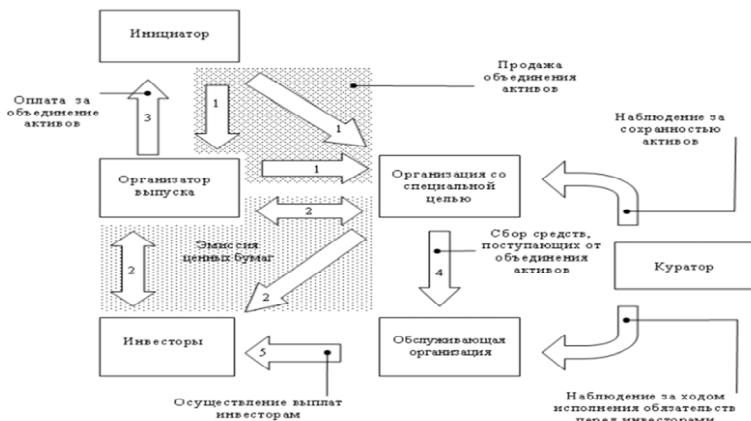


Рис. 2. Процесс создания ипотечного дериватива

На первом этапе инициатор вместе с организатором выпуска производит ревизию числящихся на балансе инициатора активов. После ее окончания происходит формирование перечня активов, которые будут использованы для выпуска ИД, а также подготавливаются условия для проведения сделки по снятию их с баланса инициатора. Передача активов от инициатора к организации со специальной целью оформляется договором купли/продажи.

Второй этап охватывает три стадии, которые заключаются в подготовке к выпуску ИД; непосредственно сам их выпуск, обеспеченных залогом активов; и отчуждение их первым владельцем путем заключения гражданско-правовых сделок. На данном этапе эмитент деривативов заключает договор с организатором выпуска.

Третий этап включает в себя оплату за операции по объединению активов, заключающуюся в направлении всех средств, собранных организатором выпуска в процессе размещения ИД, инициатору.

В ходе четвертого этапа организатором выпуска определяются и формируются договорные взаимоотношения с обслуживающей организацией, в соответствии с которыми на нее возлагается обязанность по сбору и аккумулированию средств, поступающих по активам, числящимся на балансе организации со специальной целью.

На пятом этапе обслуживающей организацией осуществляется распределение средств, полученных от объединения активов, среди инвесторов ИД. Здесь важно отметить, что для курирования сохранности

активов и полноты осуществления организацией выплат инвесторам нанимается специальный человек.

Применение методов управления доходностью ИД позволяет снизить издержки originатора (организатора секьюритизации) на рефинансирование активов, что, в свою очередь, повышает привлекательность данных инструментов для финансовых институтов. В результате развития привлечения кредитными организациями дешевых краткосрочных межбанковских ссуд или кредитов центрального банка для обеспечения выданных банком кредитов может потянуть за собой рост объемов ипотечного кредитования, что положительно скажется на обеспеченности жильем российских граждан.

Важно отметить, что доходность ИД складывается на основе оценки риска инвесторами (покупателями) и originатором (продавцом) [3, с. 115].

Далее необходимо сформулировать и на эмпирических данных проверить гипотезу относительно влияния следующих риск-факторов на доходность ипотечных деривативов российских банков как originаторов ИД: риск ликвидности, процентный риск, валютный риск и правовой риск. Исследование проведем с помощью неопределенной выборки сделок ипотечной секьюритизации российских эмитентов с 2006 по 2015 год (40 сделок, в т. ч. 30 российских сделок и 10 трансграничных) [4]. Данные, полученные в результате исследования, экстраполированы на генеральную совокупность вышеупомянутых сделок.

На основе проведенного анализа были разработаны рекомендации по управлению доходностью деривативов для российских банков-originаторов.

Во-первых, грамотное управление риском ликвидности предусматривает создание механизма контроля и принятия решений, который позволит избежать недостатка или излишка ликвидности, устранить отклонения фактических показателей от нормативных. При оценке риска ликвидности для эффективного управления доходностью необходимо уделять внимание трем основным аспектам: управлению требованиями чистого рефинансирования, включающего создание системы сроков погашения, определения превышения или дефицита средств на определенные даты; доступу к рынкам и планированию в случае непредвиденных обстоятельств.

Во-вторых, при относительно низком спреде между безрисковыми ставками российского и американского рынков сделки трансграничной секьюритизации на 0,09 процентных пунктов выгоднее внутренних. Поэтому выпуск лучше проводить в той юрисдикции, где по расчетам эмитента будет выше спрос.

В-третьих, самыми эффективными приемами снижения валютного риска, влекущими за собой повышение доходности эмитентов, являются выдача ссуд в одной валюте с условием ее погашения в другой с учетом форвардного курса, зафиксированного в кредитном договоре, форвардные валютные контракты и валютные фьючерсные контракты.

В-четвертых, выдача кредитов с плавающей процентной ставкой является одним из самых эффективных способов управления доходностью российских эмитентов при кредитном риске. Принятие такой меры может позволить банку изменять размер процентной ставки по выданному кредиту в соответствии с общим «самочувствием» экономики и уровнем финансовой стабильности, поведение которых тесно связано с индексами LIBOR и MIBOR, которые, в свою очередь, совместно с банковским спредом, определяют величину плавающей процентной ставки.

Таким образом, для того чтобы самым эффективным долговым рынком в РФ стал рынок ипотечных ценных бумаг, на российском финансовом рынке должны произойти значительные качественные изменения, в том числе и в управлении деривативами.

1. Федеральный закон от 22.04.1996 № 39-ФЗ (ред. от 06.04.2015) «О рынке ценных бумаг» (22 апреля 1996 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_177715/, доступ свободный.

2. Федеральный закон от 11.11.2003 № 152-ФЗ (ред. от 21.12.2013) «Об ипотечных ценных бумагах» (11 ноября 2003 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156130/, доступ свободный.

3. Жак Л. Опасные игры с деривативами: Полувековая история провалов от Citibank до Barings, Societe Generale и AIG. М.: Альпина Паблишер, 2012. 339 с.

4. Сделки секьюритизации ипотечных кредитов [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://rusipoteka.ru/profi/securitization/sek_yuritizaciya_ipotechnyh_kreditov.

5. Халл Д. К. Опционы, фьючерсы и другие производные финансовые инструменты. 8-е изд-е М.: «Вильямс», 2013. 1072 с

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

С. В. Кругликов, А. Ф. Терлыга, Н. Г. Терлыга
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

В работе приведен методологический подход к моделированию инновационных процессов. Выделяется и описывается основной процесс инновационной деятельности университета – коммерциализация результатов научных исследований и разработок. Представлена формализация показателей эффективности (KPI) для процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности. Разработаны математическая модель в форме системы массового обслуживания и схема информационно-модели в среде AnyLogic.

The paper gives the survey of various models and simulations providing indicators of University's innovating efficiency. The basic process of University's innovative activities, commercialization of research and design products, is considered. Description of performance indicators (KPI) for the commercialization process are formalized. Mathematical model of commercializing innovations in the University's environment, in terms of queuing system, and scheme of informational model, based on AnyLogic, are given.

Процессный подход, проблемы применения к инновационным процессам

Процессный подход был разработан и применяется с целью создания горизонтальных связей в организациях и позволяет управлению более оперативно решать возникающие вопросы и воздействовать на результат. Подразделения, задействованные в одном процессе, могут самостоятельно координировать работу и решать возникающие проблемы. В отличие от функционального подхода, управление процессами позволяет концентрироваться на результатах работы организации в целом. В процессном подходе основным элементом становится процесс. Процессный подход нацелен на повышение гибкости в управлении организацией, сокращение времени реакции на изменения рынка и внешней среды, улучшение результатов деятельности организации. Однако этот подход, в силу статичности хорошо подходит для стабильных процессов.

В инновационных процессах высокие риски, в силу этого возникает необходимость управления в условиях периодического изменения требований к результатам управления процессом.

В ситуации изменения требований к результату процесса, в работе предлагается рассмотреть управление результатами через людей, назначая им личные и групповые показатели эффективности.

Моделирование процесса коммерциализации результатов научной деятельности

Один из известных инновационных процессов, реализуемых предприятиями и организациями, является процесс коммерциализации результатов научной деятельности. Этот процесс и явился объектом моделирования в представленной работе.

Для понимания структуры моделируемого процесса была проведена функциональная декомпозиция и выделен процесс – «коммерциализации результатов инновационной деятельности» как ключевой для деятельности.

Для формирования схем бизнес-процессов в работе использовались методология функционального моделирования IDEF0 [2] и программный продукт MS Visio (рис. 1).

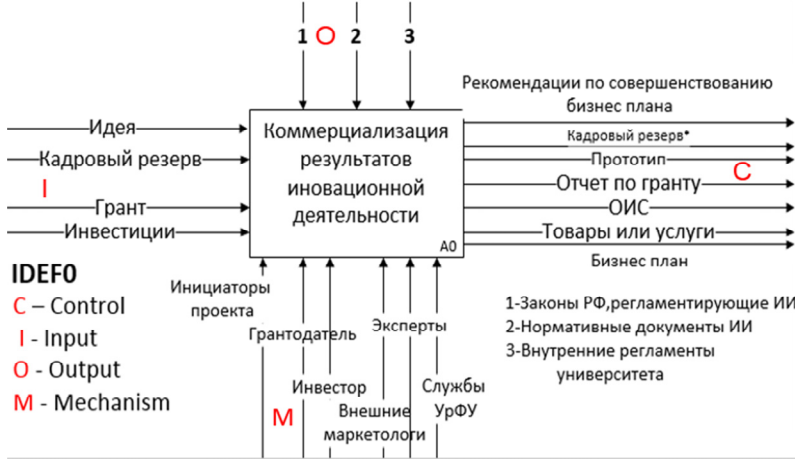


Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса коммерциализация результатов инновационной деятельности

Основным входом процесса по коммерциализации результатов инновационной деятельности является идея. Носителем идеи может быть сотрудник, который, используя результаты работы научной школы, предлагает реализовать коммерческий проект. Проект поступает в работу системы с целью обеспечить на выходе товары или услуги, реализуемые на рынке.

Далее в работе контекстная диаграмма процесса была декомпозирована на следующий уровень диаграмма процесса, содержащий четыре этапа основного процесса:

A1 – Разработка концепции;

A2 – Проверка технологической и коммерческой осуществимости;

A3 – Разработка продукта, создание и испытание прототипа или опытного технологического процесса и согласование его со стратегией маркетинга;

A4 – Определение промышленной привлекательности и подготовка производства.

Декомпозиция в формате IDEF0 (рис. 2)

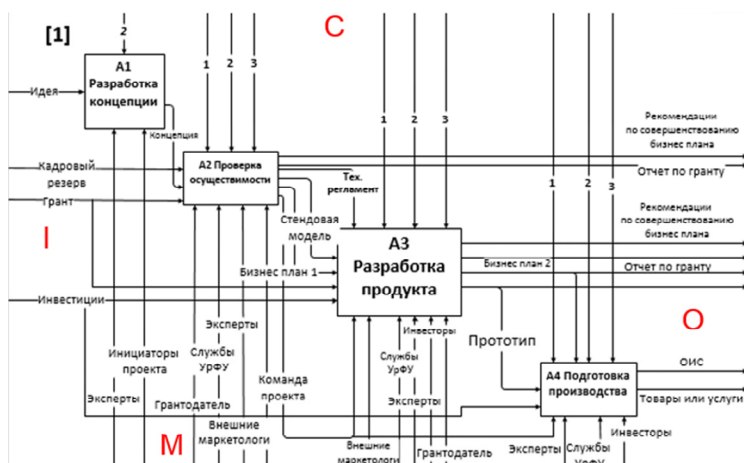


Рис. 2. Функциональная декомпозиция процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности

Моделирование показателей эффективности (KPI) процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности

Инновационный процесс – процесс, который может меняться в достаточно широких пределах. В работе предлагается рассмотреть управление результатами через личные и групповые показатели эффективности.

Для решения задачи моделирования групповых показателей эффективности (KPI) процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности, были разработаны модели соответствующих KPI.

KPI1 – Количество ОИС, регистрируемых за год (шт.);

$$KPII = K1 * Z \quad (1)$$

$K1$ – коэффициент регистрации объектов интеллектуальной собственности в процессе коммерциализации инновационной деятельности (рассчитывается из статистики);

Z – среднее число заявок в системе.

$KPI2$ – Объем средств от реализации товаров и услуг (млн руб.)

$$KPI2 = S * x \quad (2)$$

S – средняя выручка денег за год

x – количество проектов на 4-ой стадии коммерциализации

$KPI3$ – Объем средств грантовой поддержки проектов, (млн руб.)

$$KPI3 = \sum Pi * Vi * (\lambda - x) \quad (3)$$

Pi – средняя величина гранта (млн руб.)

Vi – коэффициент прохождения грантового отбора (сколько процентов проектов находящихся на первых трех стадиях получают гранты)

λ – число проектов в системе

$(\lambda - x)$ – число проектов на первых трех стадиях

$KPI4$ – Количество малых инновационных предприятий,

$$KPI4 = \lambda \quad (4)$$

Для решения задачи моделирования личных показателей эффективности (KPI) процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности, была разработана методика формирования системы оплаты труда сотрудников. Данная методика включает следующие компоненты:

1. Формирование перечня должностей (позиций), для которых будет формироваться мотивационная схема.
2. Принципы формирования дохода

Годовой доход = Фиксированная часть + Переменная часть + Бонус

Фиксированная часть – ежемесячное денежное содержание, формируемое из разных источников в согласованном размере.

Переменная часть – ежемесячная выплата, размер которой определяется степенью выполнения KPI.

Бонус – денежное вознаграждение, выплачиваемое за достижение существенных результатов деятельности.

Ключевые показатели эффективности (КПИ) определяются для каждой должности и вес каждого, исходя из целей, поставленных для данного уровня организационной структуры.

3. Определяется схема расчета переменной части (ПЧ) заработной платы в зависимости от КПИ

Мотивационная формула:

$$ПЧ = \text{Плановая сумма переменной части} * (\text{Вес КПИ1} * \text{Коэффициент КПИ1} + \text{Вес КПИ2} * \text{Коэффициент КПИ2} + \dots).$$

Значение нормативного весового коэффициента не может быть меньше 15 %.

Переменная часть не выплачивается за те месяцы, в которых план не был установлен (равен нулю).

4. Определяется порядок расчета переменной части.

Для показателей, значения которых нормируются ежемесячно, переменная часть рассчитывается по результатам, достигнутым за месяц.

$$ПЧ = \text{Плановая ежемесячная сумма переменной части} * (\text{Вес КПИ1} * \text{Коэффициент КПИ1} + \text{Вес КПИ2} * \text{Коэффициент КПИ2} + \dots).$$

Для показателей, значения которых нормируются по финансовым периодам (квартал, полугодие, год), переменная часть заработной платы рассчитывается с учетом соответствующего веса КПИ и накопленного результата по соответствующему плановому показателю.

Порядок расчета:

1. Определяется базовый объем переменной части заработной платы с учетом веса КПИ.
2. Устанавливаются плановые месячные нормативы показателя нарастающим итогом с начала по конец периода.
3. Результат по показателю учитывается нарастающим итогом ежемесячно с начала периода.
4. В случае соответствия в текущем месяце результата и норматива требованиям КПИ для данного показателя, выплачивается часть базового объема переменной части заработной платы, соответствующая достигнутому уровню показателя.
5. В конце периода производится окончательный расчет переменной части заработной платы на основании сравнения план/факт с учетом КПИ, из которой вычитается сумма, уже выплаченная в предыдущие месяцы данного финансового периода.

Пример. Формирование дохода менеджера проекта (табл. 1)

Менеджер проекта – отвечает за достижение плановых показателей проекта, выполнение устава проекта.

Таблица 1

Формирование дохода менеджера проекта

Ключевые показатели эффективности		Система измерения/расчета	
Показатели эффективности и результативности			
Объем продаж продукции проекта, руб. KPI1		План/факт (нормирование годовое)	
Некоммерческие (качественные) показатели			
Своевременное выполнение утвержденных устава проекта и плана мероприятий по проекту, KPI2		План/факт (качество и своевременность выполнения, выполнен/выполнен частично/не выполнен) (ежемесячно)	
Своевременное и полное предоставление обязательной отчетности по проекту, KPI3		План/факт (качество и своевременность выполнения, выполнен/выполнен частично/не выполнен) (ежемесячно)	
№	Методический порядок действий	Фактическое значение	
1	Должность в ИИ	Менеджер проекта сотрудник ИИ	
2	Ключевые показатели эффективности (KPI) для должности и вес каждого, исходя из целей, поставленных для данного уровня организационной структуры	KPI1, вес – 50 % KPI2, вес – 30 % KPI3, вес – 20 %	
3	Порядок расчета показателей	Факт/план * 100%	
4	Процент выполнения показателя, значение весового коэффициента	Процент выполнения показателя	Коэффициент
		< 50 %	0

	ента показателя для показателей	51–89 %	0,5
		90– 150 %	1
		151– 200 %	1,5
		Бо- лее 201 %	2,0
5	Формула планового ме- сячного дохода (фиксиро- ванная часть + переменная часть), руб.	30 000 = 10 000 + 20 000	

Моделирования процесса коммерциализации как системы массового обслуживания

Для моделирования процесса коммерциализации как системы массового обслуживания в работе сделаны следующие предположения:

Предположение 1. Процесс коммерциализации результатов инновационной деятельности – это система массового обслуживания (СМО) для работы с идеями, поступающими на вход системы.

Предположение 2. Поток событий в системе (поток идей на входе) имеет стандартное Пуассоновское распределение, т. е. за время t поступает λt – событий, где λ – плотность потока (количество заявок, поступающих в систему за единицу времени) [1].

Параметрическая запись СМО $G / M / n$,

где G – входящий поток идей имеет Пуассоновское распределение,

M – время обслуживания распределено по экспоненциальному закону.

Эта система многоканальная:

n – число каналов.

Система с очередью, число мест в очереди неограниченно.

Теория массового обслуживания устанавливает зависимость между заданными параметрами (λ и n) и характеристиками эффективности работы системы СМО:

z – среднее число заявок в системе;

R – среднее число заявок в очереди;

T_1 – среднее время обработки заявки в системе;

T_2 – среднее время в очереди.

Для дальнейшего моделирования процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности стадии процесса тоже описаны как СМО:

A_1 – Разработка концепции: имеет один канал входа, т.е. одноканальная СМО с неограниченной очередью. На одноканальную СМО поступает простейший поток заявок с интенсивностью λ . Время обслуживания показательное распределение с параметром $\mu = \frac{1}{t_{\text{обсл.}}}$. Длина очереди не ограничена. Характеристики эффективности СМО представлены в работе.

A_2 – Проверка технологической осуществимости: многоканальная СМО с неограниченной очередью.

A_3 – Разработка продукта – на вход СМО (рисунок на слайде) подается простейший поток заявок с интенсивностью λ . Обслуживание состоит из двух параллельных фаз, выполняемых в СМО1 – разработка прототипа и СМО2 – разработка стратегии маркетинга. А также СМО3 – согласование, в котором согласуются результаты СМО1 и СМО2. В СМО1 и СМО2 проводятся обслуживания заявок, а в СМО3 согласуются их результаты. Если в СМО3 происходит согласование, то заявка считается обслуженной в СМО. Если в СМО3 не происходит согласования, то заявка возвращается на повторное обслуживание в СМО. Вероятность, что заявка будет возвращена на повторное обслуживание равно $(1-p)$ и не зависит от того, сколько раз она была обработана СМО.

A_4 – Определение промышленной применимости и подготовка производства: многоканальная СМО с неограниченной очередью.

Типовой расчет в системе AnyLogic базовый для моделирования технологического процесса

В завершении имитационного моделирования процесса коммерциализации был проведен типовой расчет в системе AnyLogic [3] базовый для моделирования технологического процесса. Для моделирования бизнес процесса коммерциализация результатов инновационной деятельности было выбрано дискретно-событийное (процессное) моделирование в среде ANYLOGIC. Расчет себестоимости по видам деятельности (Activity Based Costing, ABC) помогает учесть ресурсы и затраты моделируемого нами процесса. Поскольку КРІ показателей эффективности деятельности тесно связаны с себестоимостью, эта модель помогает принять управленческое решение об эффективности использования ресурсов.

Используя библиотеку моделирования процессов в работе создана дискретно-событийная модель процесса коммерциализации инновационной деятельности, разработанная в среде AnyLogic (рис. 3).

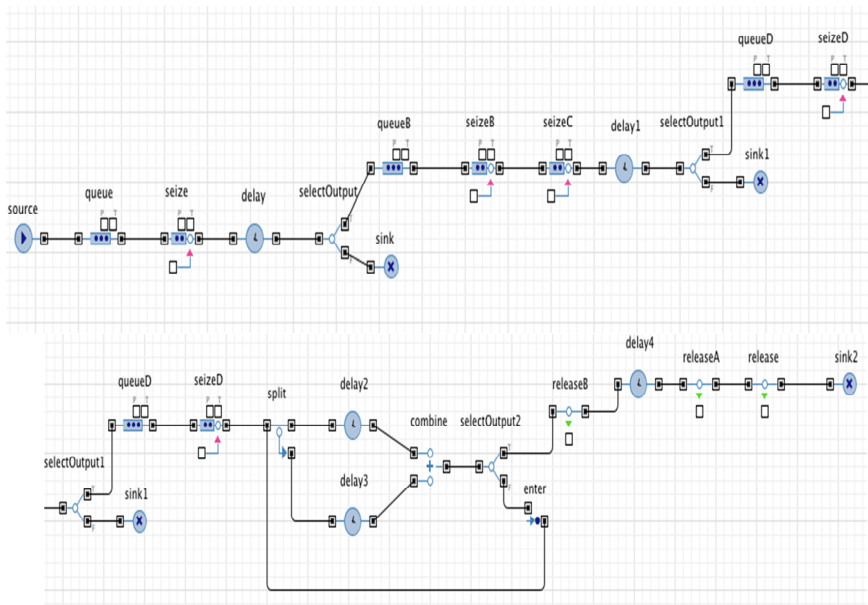


Рис. 3. Имитационное моделирование процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности в среде AnyLogic

Выводы

На основе разработанной и описанной в работе функциональной декомпозиции процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности был разработан и внедрен программный комплекс по автоматизации управления инновационными процессами.

Смоделированные показатели эффективности (KPI) процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности легли в основу формирования ряда нормативных документов (таких, как положение о системе премирования сотрудников Центра трансфера технологий УрФУ).

Разработанная математическая модель процесса коммерциализации как системы массового обслуживания и спроектированная имитационная модель процесса коммерциализации результатов инновационной деятельности в среде AnyLogic позволяет анализировать организационные и процессные изменения инновационной деятельности и прогнозировать их влияние на выполнение ключевых показателей эффективно-

сти, является основой для разработки автоматизированных систем управления инновационной деятельностью организации.

В работе описана методология подхода к моделированию инновационных процессов как сочетание процессного подхода, его соотношение с агентно-ориентированным и управление результатами инновационной деятельности через личные и групповые показатели эффективности (KPI).

-
1. *Матвеев В. Ф., Ушаков В. Г.* Системы массового обслуживания. М.: Изд-во МГУ, 1984. 242 с.
 2. URL: <http://www.nsu.ru/smk/files/idef.pdf>
 3. URL: <http://www.anylogic.ru/>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Н. А. Кузнецова, А. А. Токарев

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Данная статья посвящена методам совершенствования процессов проектирования конструкторской документации на основе информационных технологий. Особую актуальность данные проблемы играют для предприятий машиностроения, поэтому в статье методы рассматриваются на примере отдела механизации и автоматизации (ОМА) исследуемого машиностроительного предприятия. Представлены материалы, обобщающие следующие вопросы: проблемы работы с бумажной документацией, определяющие переход к новым методам проектирования; аутсорсинг как метод совершенствования работы с бумажными чертежами; использование собственных мощностей для организации перевода бумажных носителей в электронный вид. Рассматриваются следующие методы: перечерчивание вручную в САПР с бумажного документа, использование сканера. Особое внимание уделяется использованию растровой графики в процессе проектирования: использование растрового редактора, вариант преобразования растра в вектор с помощью автоматического векторизатора, использование гибридного редактора. Все методы сопровождаются графическими иллюстрациями, а также экономическими расчетами, позволяющими оценить их достоинства и недостатки. В результате осуществляется выбор наиболее оптимального метода для совершенствования процесса проектирования конструкторской документации на машиностроительном предприятии. Данный метод позволяет выполнять работы с наименьшими затратами и высоким качеством выполнения конструкторской документации.

This article is devoted to methods of improving the processes of engineering design documentation on the basis of information technologies. These problems are especially actual for mechanical engineering, so in the article, methods are discussed on the example of the Department of mechanization and automation (DMA) of the investigated engineering enterprise. Submissions summarizing the following issues: problems of the work with paper documentation defining the transition to new methods of design; outsourcing as a method of improving work with paper drawings; using own capacities for transformation paper carrier to electronic form. The following methods

are examined: redrawing manually from paper document in CAD , using scanner. Special attention is paid to the use of raster graphics in the design process: using bitmap editor, the option of converting the raster to a vector using the automatic vectorizer, the use of hybrid editor. All methods are accompanied by graphic illustrations, as well as economic calculations, allowing to assess their strengths and weaknesses. The result is the selection of the optimal method to improve the process of designing construction documentation for an engineering company. This method allows us to perform work with minimum cost and high quality of construction documentation execution.

В современном мире основой развития стала информация. Успех и конкурентоспособность любого предприятия базируется сегодня не просто на обладании неким количеством информации, а на умении эффективно ее обрабатывать, хранить и использовать.

Машиностроительное предприятие, в силу своих специфических особенностей ведущее свою деятельность на бумажных носителях, рано или поздно сталкивается с проблемой хранения, использования и обработки информации. С ростом объемов бумажной документации встают вопросы размещения документов, как правило, на площадях предприятия, а также проблемы обработки информации и трудности, связанные с использованием этих документов в дальнейшем.

Использование бумажных носителей на предприятиях приводит к определенным трудностям, которые влияют на работу всех подразделений предприятия в целом. Не секрет что в ближайшем будущем все предприятия будут стремиться к безбумажной технологии ведения производства, что, несомненно, сокращает расходы благодаря отсутствию распечаток чертежей и технологических процессов, настоящие резервы экономии при безбумажном подходе лежат в оптимизации процесса подготовки производства, сокращении числа его этапов и ускорении выхода новых изделий на рынок.

На рисунке 1 приведена диаграмма примерного процентного соотношения документации на разных носителях на предприятиях машиностроительного комплекса.



Рис. 1. Соотношение чертежей на разных носителях

Одновременное использование одного и того же чертежа несколькими людьми или отделами всегда затруднительно, а его копирование чаще всего ведет к ухудшению качества. Бумажные документы бросают вызов цивилизованному миру: высококвалифицированные инженеры тратят время на долгие поиски необходимого чертежа; ущерб от огромного количества теряющихся документов вообще не поддается учету. Даже те компании, которые успешно внедрили у себя системы автоматизированного проектирования, по-прежнему окружены морем бумажных документов. Это и старые архивы самой организации, и бумажные чертежи, полученные от подрядчиков, и так называемые «твердые копии» электронных документов, живущие собственной жизнью и частенько переживающие своих электронных родителей. Ситуация осложняется еще и тем, что лишь немногие новые проекты разрабатываются с нуля, без использования предыдущих разработок предприятия, хранящихся на бумаге или пленке. Поэтому всякий раз, когда приходит пора выпустить модернизированное изделие, организовать электронный архив, внедрить систему документооборота либо провести реконструкцию помещения или установки, возникает проблема совместного использования старых бумажных чертежей и современных программных средств САПР.

Проблема актуальна практически для всех предприятий независимо от их рода деятельности. В частности, для машиностроительных предприятий характерны большие объемы конструкторской, технологической и технической документации. Часть бумажной документации была накоплена и хранится с тех времен, когда для разработки использовались кульманы, другая часть образовалась в результате необходимости

хранения документации в архивах подразделений для отчета и надежности в течении определенного срока.

С появлением систем автоматизированного проектирования, без которых сейчас трудно представить работу инженера, сократились временные затраты на разработку конструкторской документации (КД).

При таком положении дел оптимальным решением является перевод бумажной конструкторской документации в электронный вид и размещение полученных цифровых образов в имеющейся системе электронного архива предприятия. Это дает новую жизнь бумажной документации, предоставляет возможность использовать старые документы по-новому. В таком случае главным назначением электронного архива становится переход от большого объема бумажных носителей к их электронным копиям. При этом обеспечивается простота и компактность хранения документов, а также оперативность работы с этими документами.

Попробуем оценить варианты выбора методов работы по внедрению бумажной документации в электронный архив. На рассматриваемом предприятии уже существует программное обеспечение, на основе которого создан электронный архив. Определим, как будет организован технологический процесс перевода бумажных документов в электронный вид. Можно решить проблему своими силами либо воспользоваться услугой сторонней организации.

Первый вариант – это использование производственных мощностей специализированных организаций, занимающихся внедрением, развитием и дальнейшим техническим сопровождением систем электронного архива. Изучив множество источников по данному направлению можно убедиться в актуальности проблемы, множество предприятий используют услуги по преобразованию бумажной документации в электронный вид и определению наиболее эффективного способа использования документации. Рассмотрим вариант аутсорсинга как решение нашей проблемы.

Суть метода: в течение определенного времени сторонняя специализированная организация перевозит и сканирует с помощью своих мощностей всю бумажную документацию, редактирует ее с целью очистки от растрового мусора, затем готовый обработанный вариант привозит на предприятие, где проводит работы по размещению данных файлов в электронный архив предприятия.

Преимущества метода:

- 1) Ответственность за качественное выполнение работ.
- 2) Скорость выполнения работ.

3) Нет необходимости в затратах на оборудование и принятие персонала для осуществления работ.

Недостаток метода – требование большого объема инвестиций.

На рисунке 2 приведем стоимость услуг сторонней организации ЭЛАР на перевод документации в электронный вид.

Сканирование чертежей, карт, плакатов

Широкоформатное сканирование в формате TIFF	Формат листов		
	A4	A3-A1	A0
Сканирование в градациях серого (300 dpi)	10	100	200

Работы по очистке растра от фонового шума

Подчистка чертежей	Формат листов		
	A4	A3-A1	A0
Растр в градациях серого	50	150	250

Векторизация растра чертежа, изготовление чертежа

Векторизация	Формат листов			
	A4	A2-A3	A1	A0
Базовая стоимость векторизации одного листа	200	300	600	1000
категория плотности (сложности) чертежа				
1-я категория ($K1 = 1,2$)	240	360	700	1200
2-я категория ($K2 = 1,5$)	300	450	900	1500
3-я категория ($K3 = 2$)	400	600	1200	2000

Рис. 2. Цены на перевод документации в электронный вид для сканирования

На основании данных цен можно определить, сколько потребуется инвестиций для перевода комплекта конструкторской документации в электронный вид. Возьмем средний по объему и по сложности комплект КД, находящийся в архиве отдела механизации и автоматизации. Приведем данные по объему КД и определим стоимость услуг для перевода 1 проекта. Примем коэффициент сложности для векторизации чертежей $K = 1,5$. Данные представим в табл. 1.

Таблица 1

Стоимость перевода проекта в электронный вид

Наименование форматов	Количество листов, шт.	Стоимость сканирования, руб.	Стоимость очистки от шумов, руб.	Общая стоимость раstra, руб.	Стоимость векторизации, руб.
A0	6	1200	1500	2700	9000
A1	16	1600	2400	4000	14400
A2	24	2400	3600	6000	10800
A3	78	7800	11700	19500	35100
A4	172	1720	8600	10320	51600
Итого, руб.		14720	24200	42520	120900
Итого с НДС, руб.		17370	28556	50174	142662

Из данных таблицы видно, что при переводе документации в электронный вид методом векторизации составляют 142 662 руб. на комплект КД. На получение растрового комплекта КД уйдет 50 174 руб. На простое сканирование без очистки от шумов 28 556 руб. Полученные стоимостные данные только за один проект, а их может быть сотни, поэтому такой процесс перевода может встать в круглую сумму для предприятия. Также возникают другие проблемы:

- 1) процесс перевода временно останавливает работу отдела;
- 2) риск, связанный с транспортировкой документации;
- 3) наличие грифа секретности.

Проведение работ по переводу бумажных документов в электронный вид возможно при создании бюро сканирования в структуре отдела, т. е. опираясь на собственные силы.

В отделе создается бюро, которое будет заниматься сканированием, обработкой и регистрацией документов. Приобретено соответствующее оборудование для сканирования, обработки и ввода в электронный архив документации. Также подобран квалифицированный персонал для выполнения этих работ.

Преимущества при использовании собственных мощностей:

1. Процесс перевода не влияет на работу отдела. При проведении работ по переводу документации в электронный вид, можно параллельно заниматься разработкой конструкторской документации.
2. Низкая стоимость самого процесса перевода.
3. Отсутствие необходимости транспортировки документации.

Недостатки при использовании собственных мощностей:

- 1) Требуются инвестиции в проект на покупку оборудования и затраты на квалифицированный персонал.
- 2) Требуется выполнение пилотного проекта. Это необходимо для подбора оптимальных настроек оборудования, сканирования и обработки информации.
- 3) Более медленный перевод КД по сравнению с аутсорсингом.

Перечерчивание вручную в САПР

Суть метода заключается в том, что положив перед собой чертеж, перечертить его в САД-системе. Это не самый быстрый и простой способ. Построение параметрической модели данного метода представлено на рисунке 3.

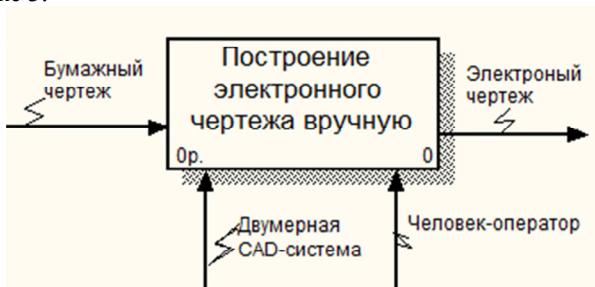


Рис. 3. Параметрическая модель процесса перечерчивания вручную в САД системе

Обычно после нескольких попыток перевода указанным способом пользователи от него отказываются. Это доказывают следующие данные, приведенные на основании хронометража рабочего времени на операцию перечерчивания. Данные приведены в табл. 2.

Из данных таблицы следует, что на перечерчивание комплекта конструкторской документации вручную уйдет 469 ч чистого рабочего времени сотрудника, который будет заниматься переводом. Этот метод несет огромные трудозатраты, он непродуктивен, как следствие, присутствует человеческий фактор. При выполнении данного вида работ возможно появление ошибок в чертежах после перечерчивания.

Таблица 2

Затраты времени на перечерчивание проекта в САПР

Наименование Формата	Среднее время перечерчивания листа, ч	Количество листов в проекте, шт.	Общее время перечерчивания проекта, час
A0	6	6	36
A1	4,5	16	72
A2	3	24	72
A3	1,5	78	117
A4	1	172	172
Итого			469

Для осуществления данного метода необходим большой штат сотрудников и оборудованные рабочие места, чтобы сократить время на полный перевод архива в электронный вид, что влечет большие инвестиционные затраты в проект.

Векторная графика – это математическое описание функции, модели.

К плюсам данного метода относится полная векторизация, которая обеспечивает легкость внесения корректировок в чертеж и осуществляет гибкость редактирования. Метод характеризуется большими временными затратами на перечерчивание и, как следствие, инвестициями в проект. На примере можно показать, сколько потребуется средств на зарплату сотрудника для перечерчивания проекта:

- средняя ставка сотрудника, который занимается перечерчиванием 200 руб./ч;
- время на перечерчивание одного проекта, составляет 469 часов;
- стоимость работ сотрудника по перечерчиванию проекта $(200 \text{ руб./ч}) \times (469 \text{ ч}) = 93\,800 \text{ руб.}$ И это только на зарплату сотруднику, в это значение не входит стоимость оборудования рабочего места, затраты на электроэнергию и прочие расходы.

Вариант перечерчивания трудоемок, для сокращения временных затрат используем вариант сканирования это, бесспорно, оптимальный способ перевода бумажного чертежа в электронный вид. Данный метод

менее трудоемкий в отличие от остальных, но требует затраты на покупку оборудования для сканирования, которые окупит экономия времени, возникающая при использовании в данном случае. С помощью данного метода можно быстро отцифровывать большие объемы бумажной документации. Определим время сканирования среднего комплекта КД. Для этого определим следующие параметры в таблице 3.

Из данных таблицы видно, что общее время на сканирование проекта составляет 5,7 ч рабочего времени специалиста по сканированию. Это гораздо быстрее, чем перечерчивание вручную. Полученный цифровой файл будет отличаться от перечерчиваемого варианта, так как после сканирования получается графический вид изображения.

Таблица 3

Затраты времени на сканирование

Тип оборудования	Наименование формата	Количество листов, шт.	Время на сканирование, ч
Широкоформатный сканер	A0	6	0,2
	A1	16	0,53
	A2	24	0,8
Сканер формата А3	A3	78	1,3
	A4	172	2,86
Итого, ч			5,7

Определимся с понятиями графического (растрового) изображения.

Итак, после сканирования мы получаем так называемое **растровое изображение**, или набор точек (рис. 4). Характеризуется разрешением – количеством точек на единицу площади изображения.

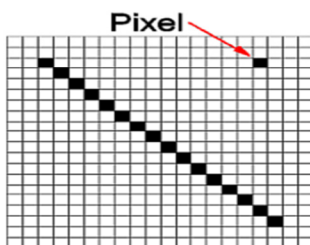


Рис. 4. Пример растрового изображения

Полученный растровый вид графики после сканирования может не отвечать всем требованиям качества для работы с документом в дальнейшем. Возникают такие проблемы, как «Рыхлая графика», «Потерянные линии», «Слипшиеся линии».

Данные проблемы решаются приобретением оборудования, которое может улучшать качество сканированного изображения. Чем лучше качество отсканированного изображения, тем меньше времени и сил будет затрачено на его обработку. Сканированные документы высокого качества можно получить только на профессиональном оборудовании. Нельзя экономить на формате сканера – точная сшивка изображения из кусков займет очень много времени и приведет к невосполнимым потерям точности. Только профессиональное оборудование для сканирования дает возможность подбирать оптимальные режимы и получать наилучшие результаты.

В данном случае чертежи будут занимать меньше места, будет проще их пересылать и править, вносить изменения. Однако требуется специальное программное обеспечение (графический редактор). На рисунке 5 изображена параметрическая модель процесса сканирования и чистки от растрового мусора.



Рис. 5. Параметрическая модель получения электронного чертежа

Еще одной проблемой является повышение качества растрового изображения. С данной проблемой справляются графические редакторы с помощью основных инструментов повышения качества.

Для повышения качества изображения с помощью графического редактора необходимо затратить определенное время, понадобится графический редактор. В таблице 4 приведем общие данные перевода документации в электронный вид методом сканирования с учетом временных затрат на повышение качества изображения в графическом редакторе.

Графический редактор осуществляет функцию автоматической обработки изображения. Определим временные затраты для каждого вида форматов.

Из данных таблицы 4 видно, что общее время на перевод одного проекта методом сканирования и повышения качества растрового изображения составляет 22 ч.

Основное преимущество данного способа метода является простота и малые временные затраты на сканирование и обработки информации.

Таблица 4

Общие затраты времени на сканирование и обработку комплекта КД

Наименование форматов	Количество листов, шт.	Время сканирования, ч	Время на повышение качества изображения, ч	Общее время на перевод, ч
A0	6	0,2	0,5	0,7
A1	16	0,53	1,3	1,83
A2	24	0,8	2	2,8
A3	78	1,3	3,9	5,2
A4	172	2,86	8,6	11,46
Итого		5,7	16,3	22

После завершения этапа сканирования и повышения качества полученное растровое изображение можно использовать только для просмотра изображения. Это идеально подходит для определенного ряда задач. Но для редактирования, внесения изменений и работы с документом этого недостаточно. Для этих функций понадобится специальное программное обеспечение.

После сканирования мы получили растровую графику, для ее корректировки можно использовать растровый редактор. Дело в том, что технология редактирования растровой графики в стандартном растровом редакторе коренным образом отличается от редактирования векторной графики в редакторе векторном (рис. 6). Можно легко выбрать и удалить мусор, но не изменить, например радиус растровой окружности или длины линии.

Автоматическая векторизация – это перевод растровой графики в векторную при помощи специального программного обеспечения.

Таким образом, становится очевидным, что глобальная векторизация может и должна применяться лишь там, где без векторного представления не обойтись, например, при использовании чертежа для создания 3D-модели изделия, управляющей программами для станка с ЧПУ, или там, где требуется очень значительная (более 80 %) переработка отсканированного материала.

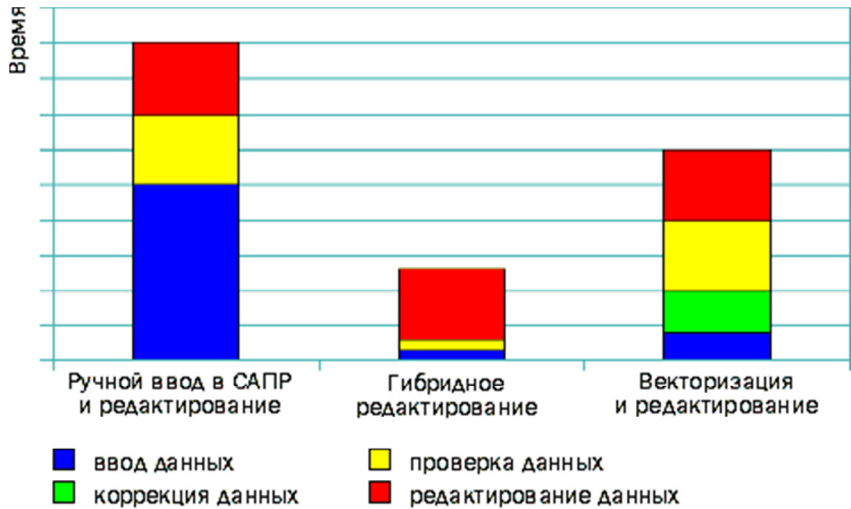


Рис. 6. Диаграмма затрат времени корректировки сканированного документа при перерисовывании, автоматической векторизации и гибридной технологии

На основании рассмотренных методик приведем структурную схему возможных вариантов перевода и использования электронных чертежей в дальнейшем. Структурная схема приведена на рис. 7.

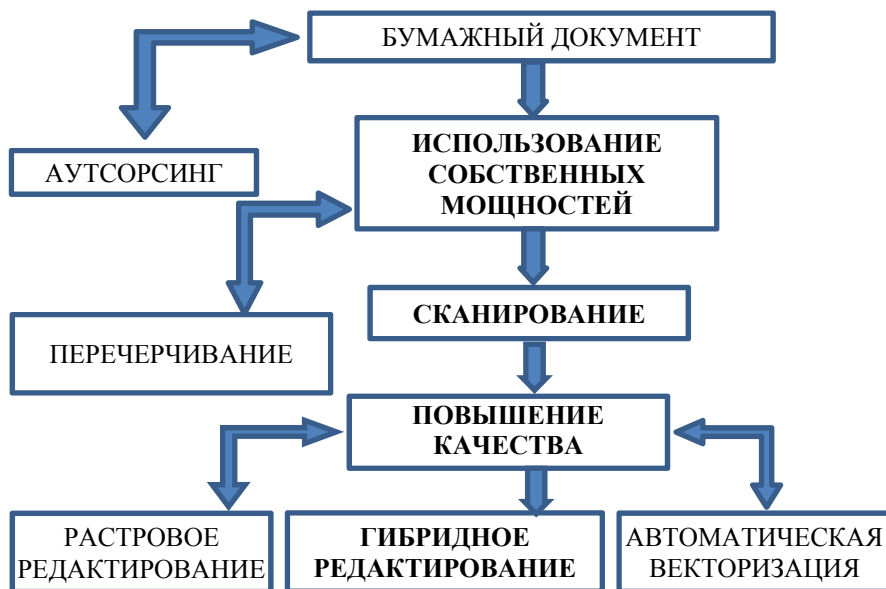


Рис. 7. Структурная схема возможных вариантов перевода и использования электронных чертежей

Выбранный путь совершенствования процесса проектирования конструкторской документации, выделенный на рисунке 7, удовлетворяет всем требованиям использования электронных чертежей в дальнейшем и требует наименьших затрат времени на осуществление проекта, а также минимальных инвестиционных вложений. Данный путь оптимален для конструкторских служб предприятий машиностроения.

1. Аббасов И. Б. Создаем чертежи на компьютере в AutoCAD 2012. М.: ДМК Пресс, 2011. 136 с.
2. Авдеева М., Чиркин А. Перевод бумажной документации в электронный вид. Опыт работы // Программное обеспечение. 2011. № 20.
3. Булычев Д., Рангаева Е. Векторизация – мифы, реальность, альтернативы // Программное обеспечение. 2011. № 26–30.
4. Жарков Н. В., Прокди Р. Г., Финков М. В. AutoCAD. Полное руководство. М.: Наука и техника, 2012. 624 с.

МЕТОДИКА НОРМИРОВАНИЯ И МОТИВАЦИИ ТРУДА БРИГАДЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАБОЧИХ НА ПРИМЕРЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ТРУБНОГО СТАНА

С. Ю. Маталасов, Е. Ю. Кузнецова, О. О. Подоляк
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Повышение производительности стало одним из важнейших критериев эффективности работы промышленного предприятия. С другой стороны, опыт последних лет показывает, что простая замена оборудования на более современное, мощное, производительное не приводит к желаемому уровню повышения эффективности (производительности). Мы считаем, что основополагающим фактором успеха на данный момент является человеческий фактор – для стабильного и качественного превышения производительности необходимо создать эффективную мотивационную систему.

Increase of productivity became one of the most important criteria of the overall industrial enterprise performance. On the other hand, experience of the last years shows that the simple equipment replacement on more modern, powerful, productive doesn't lead to the desirable level of efficiency (productivity) increase. We consider that a fundamental factor of success at the moment is the human factor – for stable and high-quality excess of productivity it is necessary to create effective motivational system.

Проведя несколько исследовательских проектов на промышленных предприятиях Уральского региона, наша исследовательская группа определила для себя наиболее остро стоящие проблемы:

- ужесточение норм без изменения мотивационной составляющей не приводит к повышению производительности труда;
- особенности современного оборудования и технологии требуют комплексного подхода к организации работы на данном оборудовании. Как следствие наиболее эффективной становится бригадная форма организации труда;
- мотивационная составляющая должна отвечать требованиям простоты, прозрачности и понятности.

В ходе исследования был проанализирован ряд подходов к организации труда и формировании системы мотивации, позволяющей максимально повысить производительность. Полученные теоретические алгоритмы и схемы авторский коллектив применил на ОАО «Ялutorовский автомобильный завод».

Исследования проводились на участке изготовления прямошовных электросварных труб ОАО «Ялutorовский автомобильный завод». На данном участке расположен трубоэлектросварочный агрегат для производства круглых и профильных труб с исходным диаметром заготовки от 63 до 127 мм. На участке также расположены: склад хранения заготовок – штрипсов, склад оснастки и необходимых запасных частей, участок упаковки и вылеживания готовых паечек, склад готовой продукции.

На момент начала наблюдений (лето 2014 г.) производственные бригады обладали приемлемой универсальностью. Производительность самого оборудования с точки зрения его технической и технологической возможностей позволяла принципиально увеличить выпуск.

Необходимость повышения производительности участка в условиях текущего состояния рынка сбыта готовой продукции диктовала необходимость внедрения эффективной системы мотивации и оплаты труда, что потребовало проведения тщательного анализа состояния рабочих бригад, их отношения к собственной деятельности и поиска мотивирующих факторов.

В ходе анализа, который включал в себя несколько этапов, был выявлен один из основных сдерживающих факторов – нежелание рабочих повышать производительность в виду неопределенности зависимости их заработной платы от объема выпущенной продукции. Другими словами, рабочие не видели смысла делать больше продукции за ту же среднюю заработную плату, которая у них имелась.

После определения этого фактора был сделан анализ статистики за 2014 г по следующим параметрам:

- численность персонала на участке;
- количество произведенной трубы на участке по бригадам;
- начисленная заработная плата по специалистам производственных бригад участка;
- количество и время переналадок производственной линии;
- количество и время ремонтов производственной линии;
- характер и время простоев производственной линии.

В табл. 1 приведены данные за второе полугодие 2014 г. по исследуемому участку.

Таблица 1

Выплаченная заработная плата в пересчете на тонну готовой продукции или на одну единицу готовой продукции

Месяц	Средняя наценка на 1 трубу по общему фонду оплаты труда, руб.
Июль	28,01
Август	75,05
Сентябрь	19,98
Октябрь	17,80
Ноябрь	39,90
Декабрь	27,20
Средняя	26,71

Из данных табл. 1 видно, что доля заработной платы в стоимости готовой продукции нестабильна и, по сути, хаотично меняется. Одновременно с этим объем выпуска готовой продукции по месяцам не отличался более чем на 15 % от среднемесячного за этот период. Проведенный корреляционный анализ только подтвердил отсутствие взаимосвязи между объемом выпуска и выплаченной заработной платой, что считается недопустимым.

Стоит отметить, что система оплаты труда на предприятии повременная, однако при этом ведется строгий учет выпущенной продукции, и заработная плата состоит из двух частей – окладной и премиальной. Применяемая система сложная для понимания работников, трудоемкая, что подтверждает необходимость ее модернизации.

В ходе переговоров с собственниками предприятия и рабочими участка были установлены критерии приемлемости результатов системы расчета заработной платы на участке: для руководства основной критерий – величина начисленной заработной платы в стоимости одной выпущенной трубы, для работников – величина среднемесячной заработной платы, которую они будут получать.

За основу системы оплаты труда была выбрана модель, при которой 100 % времени трудовой смены тратилось на производство годной продукции. При этом для установления эталонной производительности было взято максимальное зарегистрированное фактическое значение скорости производства трубы на исследуемом участке.

Используя первый критерий приемлемости – величину заработной платы на одну трубу – был установлен максимальный возможный объем фонда оплаты труда на производственную бригаду исходя из максимальной возможной производительности трубоэлектросварочного агрегата, рассчитанной по максимальной *зарегистрированной фактической скорости* производства трубы. Иными словами была установлена максимальная возможная заработная плата для каждого работника участка через максимальную возможную заработную плату всей бригады.

Общим решением руководства были установлены рамки заработной платы для специалистов разного уровня в составе бригады. Максимальная величина заработной платы для старшего оператора определяла заработную плату остальных работников: максимальная заработная плата операторов и сварщика устанавливалась на уровне 0,9, а заработная плата подсобных рабочих – на уровне 0,6 от заработной платы старшего оператора.

Установленная максимальная возможная заработная плата по специалистам включает в себя две части – окладную, минимальный размер оплаты, и премиальную.

Установленная величина максимальной возможной заработной платы по специальностям одновременно является недостижимой, т. к. возможна только при 100 % выработке на линии. Другими словами, рабочие могут получить оплату труда в размере максимальной установленной только при условии, что они смогут производить трубу без простоев и на максимальной возможной зафиксированной скорости производства трубы.

После анализа статистики времени, затраченного на проведение аварийных и плановых ремонтов, а также времени, затраченного на переналадки и непроизводственные простои на исследуемом участке за второе полугодие 2014 г. были сделаны следующие выводы:

- Среднее время переналадки – 8 ч.
- Среднее количество переналадок в месяц – 4.
- Среднее количество часов в месяц, потраченных на устранение аварий, – 16.
- Самая частая причина аварии – износ подшипника в прокатных клетях линии.
- Профилактические ремонты успевали проводить во время переналадок линии и отдельно их не выделяли.
- 85 % непроизводственных работ – переналадок и ремонтов – выполняются силами производственной бригады, остальное – с привлечением профильных специалистов предприятия – электриков, электронщиков и слесарей-механиков.

- Время перерывов, связанных с нарушением трудовой дисциплины, ничтожно мало и при наличии отражалось в табелях в виде часов отсутствия на рабочем месте.

Исходя из принятой структуры рабочего времени, а также из анализа данных, полученных в ходе исследования фактических затрат рабочего времени на участке, принята за основу следующая схема расчета заработной платы:

$$\text{ЗП} = A \times X + B \times Y + C, \quad (1)$$

где ЗП – заработная плата одного рабочего за месяц;

A – стоимость производственного часа, рассчитанная из максимальной возможной заработной платы работника;

X – число производственных часов;

B – стоимость непроизводственного часа;

Y – число непроизводственных часов;

C – стимулирующая или депремирующая добавка/вычет, принимаемая по итогам месяца на усмотрение прямого или высшего руководителя; введена как дополнительная переменная, *по умолчанию принимается равной нулю*.

Число производственных часов X – основная величина, которая определяет размер будущей заработной платы работника. Она может быть выражена формулой:

$$X = X_{\text{тр}} + X_{\text{нал}}, \quad (2)$$

где $X_{\text{тр}}$ – количество часов, определяемых выпущенной годной продукцией;

$X_{\text{нал}}$ – количество часов, *отводимых* на переналадку линии; по итогам анализа статистических данных за II квартал 2014 г. *устанавливается равным 8 часам на одну переналадку*.

Часы, определяемые выпущенной годной продукцией $X_{\text{тр}}$ согласно ранее принятых договоренностей, могут быть вычислены по формуле:

$$X_{\text{тр}} = N / N_o, \quad (3)$$

где N – количество выпущенных труб за прошедший месяц;

N_o – нормируемое количество труб в час, которое может быть выпущено на максимальной возможной фактической скорости без остановов для конкретного типоразмера труб.

Число непроизводственных часов Y определяется как разность между часами, указанными в таблице бригады $T_{\text{таб}}$ и числом производственных часов:

$$Y = T_{\text{таб}} - X. \quad (4)$$

Стоимость производственного часа A рассчитывается из максимальной возможной заработной платы работника:

$$A = 3P_{\text{макс}}/T_{\text{м}}, \quad (5)$$

где $3P_{\text{макс}}$ – максимальная заработная плата в месяц для конкретного работника бригады;

$T_{\text{м}}$ – число часов в прошедшем месяце согласно рабочего графика.

В свою очередь стоимость непроизводственного часа B рассчитывается исходя из «голового» оклада работника:

$$B = 3P_{\text{окл}}/T_{\text{м}},$$

где $3P_{\text{окл}}$ – месячный оклад конкретного работника бригады согласно штатного расписания (приводились выше);

Учитывая достаточно широкую номенклатуру производимых труб, а также среднее количество переналадок в месяц, нормируемое количество труб в час N_o , устанавливается для каждого конкретного производимого на линии типоразмера труб. Тогда уточненная формула для вычисления количества производственных часов X в прошедшем месяце может быть представлена в следующем виде:

$$X = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_o i} + 8 \times m, \quad (6)$$

где n – число произведенных типоразмеров труб за прошедший месяц;

m – число переналадок, проведенных за прошедший месяц.

В общем случае n и m могут отличаться на 1 (единицу) в ту или другую сторону или быть равными: месяц может начинаться и заканчиваться переналадкой, начинаться или заканчиваться переналадкой, начинаться и заканчиваться производством трубы.

Стоит добавить, что введенная дополнительная переменная C может быть использована и фактически используется на предприятии для дополнительного премирования или депремирования отдельных работников. Например, в случае нарушения приказа об обязательном наличии защитной каски на голове, или курении в неположенных местах применяется отрица-

тельное значение данной переменной. Либо в случае проявления особых навыков или выполнении дополнительных работ по согласованию с руководством может быть применена стимулирующая выплата со знаком плюс.

После всех допущений и преобразований итоговая формула для расчета заработной платы работников будет следующей:

$$ЗП = \frac{ЗП_{\text{макс}}}{Т_{\text{м}}} \times \left(\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{No_i} + 8 \times m \right) + \frac{ЗП_{\text{окл}}}{Т_{\text{м}}} \times \left(Т_{\text{таб}} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{No_i} + 8 \times m \right) \right) + C \quad (7)$$

Таким образом, все время, потраченное на обслуживание линии, на ремонты, в том числе аварийные и плановые, а также время, потраченное на переналадку линии сверх оговоренных восьми часов, предлагается оплачивать по голому минимальному окладу согласно штатного расписания, что должно будет стимулировать бригаду сокращать это время до минимума.

На данном этапе необходимо было провести анализ статистических данных с целью определения приемлемых значений ЗП_{макс} для каждого рабочего бригады.

После предварительного согласования указанной схемы расчета заработной платы между рабочими и собственниками предприятия вновь были рассмотрены данные исследуемого периода – за II полугодие 2014 г. Используя данные наблюдений и рапортов с рабочих мест, тем самым имея на руках эмпирически установленные значения *No* для каждого типоразмера произведенных труб, известные количества произведенных труб и количества переналадок и отталкиваясь от установленной максимальной величины заработной платы в пересчете на одну готовую трубу, методом подбора были вычислены значения ЗП_{макс} для каждого рабочего бригады.

Ниже в таблице 2 приведены значения фактически выплаченной заработной платы в пересчете на единицу продукции и аналогичные значения, полученные с применением новой системы расчетов:

Таблица 2

Фактически выплаченная заработная плата

Месяц	Средняя наценка на 1 трубу по ФАКТИЧЕСКОМУ общему фонду оплаты труда	Средняя наценка на трубу по ПРЕДЛАГАЕМОМУ общему фонду оплаты труда, руб.	Разница ФАКТИЧЕСКОГО и ПРОЕКТНОГО по отношению к ФАКТИЧЕСКОМУ, %
Июль	28,01	23,89	14,72

Месяц	Средняя наценка на 1 трубу по ФАКТИЧЕСКОМУ общему фонду оплаты труда	Средняя наценка на трубу по ПРЕДЛАГАЕМОМУ общему фонду оплаты труда, руб.	Разница ФАКТИЧЕСКОГО и ПРОЕКТНОГО по отношению к ФАКТИЧЕСКОМУ, %
Август	75,05	26,40	64,83
Сентябрь	19,98	17,34	13,20
Октябрь	17,80	16,53	7,14
Ноябрь	39,90	21,77	45,45
Декабрь	27,20	22,51	17,26
Средняя	26,71	19,84	25,74

Отталкиваясь от рассчитанных параметров, были установлены следующие значения ЗПмакс по специалистам: старший оператор – 45 000 руб., оператор/сварщик – 38 000 руб., подсобный рабочий – 30 000 руб.

Необходимо указать, что средняя заработная плата, выплаченная на исследуемом участке за II квартал 2014 г. квалифицированным рабочим, составила 20–22 тыс. руб., подсобным рабочим – 15–17 тыс. руб. При этом из приведенных выше данных видно, что если бы начисление проводилось по предлагаемой новой схеме, то заработная плата была бы существенно меньше. Эти данные были предоставлены всем участникам исследования. Одновременно с этим рабочим было разъяснено, что *поддерживая работоспособность линии и скорость прокатки трубы на заданном уровне, обеспечивая переналадку не медленнее, чем за восемь часов, можно добиться двукратного увеличения заработной платы для каждого рабочего на участке.*

Обозначив ЗПмакс непосредственно работникам участка, был получен неожиданный результат: бригадиры и квалифицированные рабочие стали предлагать пути и способы повышения скорости работы производственной линии. На время переходного периода – январь 2015 г. – было принято решение рассчитывать заработную плату двумя способами – старым и предлагаемым – и выплатить наибольшую. Тем самым удалось снять у рабочих определенную боязнь грядущих перемен. С февраля 2015 г. новая система расчета заработной платы была введена

приказом по производству. В нем же были закреплены основные условия и нормы производства по всем производимым сортаментам труб.

Итогом внедрения новой системы мотивации стал качественно другой подход рабочих к своим обязанностям. Наблюдения показали, что помня о низкой оплате ремонтных работ и иных непроизводственных простоев, бригады стали задерживаться для обслуживания стана, ремонты стали проходить быстрее, было реализовано несколько рационализаторских предложений со стороны операторов, в том числе по работе складского хозяйства.

Наблюдения за февраль-март 2015 г. показали:

- средняя производительность линии за 8-часовую смену возросла с 65 до 85 т;
- скорость прокатки увеличилась на 15 %;
- количество готовых труб возросло с максимальных 640 шт. в 8-часовую смену в 2014 г. до 1040 шт. в марте 2015 г.;
- Средняя наценка на одну трубу снизилась в марте 2015 года до 17 руб.

Результаты внедрения признаны успешными, руководству предприятия предложено адаптировать данную систему мотивации и расчета заработной платы и для других участков производства профильных труб.

После определенных доработок под условия конкретных предприятий данная система может быть применена и в цехах механообработки, ориентированных на серийный или крупносерийный выпуск продукции.

1. *Афонченко Д. А.* Дефекты и недостатки в производственном нормировании / социальные науки. Энгельс : Изд-во: ООО «Академия управления», 2014. С. 3–12.

2. *Бухалков М. И.* Организация и нормирование труда : учебник для вузов. 4-е изд., испр. и доп. М.: ИНФРА-М, 2013.

3. *Подольяк О. О., Гамберг А. Е.* Особенности технологии организации и нормирования труда сервисных служб // Инженерная мысль машиностроения будущего : сб. материалов Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. с международ. участием. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 292–296.

СОДЕРЖАНИЕ

Материаловедение и металлургия.....	5
Машиностроение	498
Энергетика.....	745
Экономика производств	888

Электронное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
ЭНЕРГЕТИКА

Сборник научных трудов

Редакторы *Крамаревская Е. Е., Попова В. И.*
Верстальщики *Таскаев В. В., Матвеев В. К.*

Подписано в печать 08.07.15.
Заказ № 294. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 47,2

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

Издательско-полиграфический центр УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7(343) 350-56-64, 350-90-13.
Факс: +7(343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru